

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ТРІЩУК РУСЛАН ЛЮБОМИРОВИЧ

УДК 655.1/.3(043)

ДИСЕРТАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

05.05.01 – машини і процеси поліграфічного виробництва

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Р. Л. Тріщук

Науковий керівник:

Киричок Петро Олексійович доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Трищук Р. Л. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання при виготовленні інтегральних обкладинок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.01 – машини і процеси поліграфічного виробництва. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертацію присвячено розробці технологічного забезпечення якості та експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання при виготовленні інтегральних обкладинок і встановленню закономірностей впливу комплексного технологічного процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки на якісні показники кінцевої продукції. Її актуальність полягає в необхідності забезпечення високої зносостійкості та точності роботи деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок. Найменші відхилення в його роботі, які можуть бути спричинені зношуванням рухомих циліндричних деталей, призводять до проковзування та зміщення заготовок при їх подачі до фальцювально-склеювального блоку, і, як наслідок, зміщення фальців і нанесення клейового шару в непередбачених місцях негативно впливають на кінцеву якість обкладинки та продукції загалом.

Автором уперше запропоновано узагальнену логічну схему в параметричному вигляді моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок і якості та експлуатаційних властивостей деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок.

Уперше розроблено технологічне забезпечення, яке здатне покращити координатне позиціонування при переміщенні обкладинок через

координувально-транспортувальний блок з одночасним зміцненням поверхонь його циліндричних деталей.

Для розробленої комплексної технології формування повністю і частково регулярного мікрорельєфів уперше встановлено аналітичний взаємозв'язок між параметрами мікрорельєфів і технологічними режимами їх формування. Це дає змогу отримати прогнозовані параметри мікрорельєфу поверхні і, як наслідок, підвищити зносостійкість деталей поліграфічного обладнання та забезпечити точність позиціювання обкладинок у координувально-транспортувальному блоці.

Виявлено закономірності формування геометричних характеристик поверхні і фізико-механічних параметрів приповерхневого шару при комплексному технологічному процесі обробки деталей координувально-транспортувального блоку, а також їх вплив на якість обкладинок.

Проведено аналіз продукції, що була вироблена на лінії для виготовлення інтегральних обкладинок та визначено ключові фактори, які впливають на кінцеві якісні характеристики готових виробів. Аналіз показав, що крім властивостей вихідного матеріалу, клеїв тощо значну роль у створенні якісної продукції відіграє координувально-транспортувальний блок лінії, зокрема його рухомі частини – сталеві вали та притискні ролики, які забезпечують точність координатного позиціювання вихідних заготовок до фальцювально-склеювального блоку та, відповідно, точність згинів та обробки клеєм потрібних зон.

Обґрунтовано вибір матеріалів і наведено умови для проведення теоретичних та експериментальних досліджень по впровадженню комплексної технології оздоблювально-зміцнювальної обробки (ОЗО) поверхонь деталей координувально-транспортувального блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами та забезпечення контурної стабільності виготовленої продукції.

Розроблено методику досліджень по кожному етапу комплексної зміцнювальної обробки: наведено перелік технологічного обладнання,

подано його опис, технічні параметри, порядок та умови роботи, встановлено оптимальні режими роботи для кожного технологічного процесу.

Запропоновано вимірювальне обладнання та методику проведення досліджень по визначенню таких основних якісних характеристик оброблених зразків, як геометричні параметри поверхні (шорсткість, характеристики мікрорельєфу), фізико-механічні параметри (твердість, залишкові напрути, мікроструктура), експлуатаційні параметри (зносостійкість, корозійна стійкість) та їх вплив на кінцеву поліграфічну продукцію, а саме, на контурну стабільність готових обкладинок.

Теоретичні дослідження здійснені з урахуванням основних аналітичних залежностей технології поліграфічного виробництва, фізико-механічних і фізико-хімічних процесів, матеріалознавства, статистичних методів контролю, структурно-функціонального та системного аналізу.

Експериментальні дослідження виконувались на новоствореній експериментальній лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами, на сучасному вимірювальному та випробувальному технологічному обладнанні в лабораторних і виробничих умовах.

Автором уперше обґрунтовано та розроблено спосіб формування комбінованого регулярного мікрорельєфу на циліндричних поверхнях деталей поліграфічного обладнання, реалізація якого позитивно впливає на точність координатного позиціювання палітурного матеріалу, і, як наслідок, на якість готових обкладинок. Новизна цього способу захищена патентом на корисну модель України.

Запропоновано комплексний технологічний процес оздоблювально-зміцнювальної обробки циліндричних рухомих деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок, в основу якого поставлено завдання підвищити параметри якості та експлуатаційні властивості поверхневого шару циліндричних валів блоку, а також покращити точність координатного позиціювання в ньому палітурного матеріалу. Розроблено узагальнений алгоритм керування таким комплексним технологічним процесом.

Для встановлення взаємозв'язку з метою прогнозування, а в подальшому й керування не тільки контурною стабільністю, а й експлуатаційними властивостями деталей, автором розроблено узагальнену логічну схему моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок та експлуатаційних властивостей циліндричних деталей.

Встановлено аналітичну залежність між режимами обробки (геометричними параметрами елементів мікрорельєфу та радіуса сфери деформувального елемента) і відносною опорною площею поверхні. Це дозволяє шляхом регулювання параметрів режимів обробки отримати оптимальну контактну площу робочих поверхонь деталей, які безпосередньо контактують з палітурним матеріалом.

На основі теоретико-експериментальних досліджень отримано математичні моделі, які описуються рівняннями регресії, за рахунок керованих факторів: радіусів деформувального інструмента, зусиль вдавлювання, величини подачі на перших двох етапах обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД), товщини азотованого шару. Отримані моделі дозволяють прогнозувати інтенсивність зношування поверхневих шарів циліндричних деталей.

У результаті числового моделювання перших двох етапів комплексної обробки, а саме процесу вібраційного обкатування та подальшого алмазного вигладжування, встановлено, що максимальна величина напружень і деформацій спостерігається в момент контактування деформувального інструмента з деталлю. При віддаленні від місця контакту величини напружень і деформацій зменшуються, наближаючись до нуля. Застосування такої моделі для процесів ОЗО дозволяє спрогнозувати властивості поверхневого шару оброблюваних деталей.

Шляхом дослідження мікроструктури сталевих зразків встановлено підвищення міцнісних характеристик поверхневого шару металу та збільшення його твердості за рахунок внутрішньозернового дислокаційного зміцнення, яке зумовлене деформаціями, що розповсюджуються в глибину матеріалу після перших двох етапів комплексної ОЗО. Також після третього етапу комплексної

обробки виявлено значне підвищення твердості поверхні та градієнтний розподіл твердості на глибину понад 600 мкм у приповерхневих шарах, яке спричинене утворенням у них нітридного прошарку, унаслідок чого відбувається додаткове зміцнення деталей і підвищення їх зносостійкості.

Виявлено значне підвищення твердості поверхні та приповерхневих шарів деталей після іонного азотування в плазмі геліконного розряду, без зміни мікрогеометрії поверхні, що пояснюється градієнтним утворенням нітридів у приповерхневих шарах, яке сягає на певну глибину, прямуючи до нуля.

Дослідження зносостійкості показали при комплексному трьохетапному технологічному процесі ОЗО підвищення зносостійкості деталей зі сталі 45 у більш, ніж 4 рази порівняно з початковим станом (чистове точіння) і в 2,5 рази порівняно з обробкою ППД. Виявлено, що покриття з більшою мікротвердістю мають більші значення зносостійкості.

Визначено вплив комплексної технології на якісні параметри готових обкладинок. Встановлено що після її впровадження відсоток відбракування кінцевої продукції суттєво зменшився (залежно від тиражу). Наприклад, для тиражу в 10000 примірників відсоток відбракування знизився на 1,72 %.

Ключові слова: поліграфічне обладнання, інтегральна обкладинка, зміцнення, вібраційне обкатування, мікротвердість, азотування, регулярний мікрорельєф, зносостійкість.

ABSTRACT

Trischuk R. L. Technological assurance of quality and operational properties of details of the printing equipment at manufacturing of flexible covers. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis is for getting a degree of engineering sciences candidate in 05.05.01 specialty «Machines and Processes of Printing Production» – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021

The dissertation is devoted to the development of technological quality assurance and operational properties of printing equipment parts in the manufacture of integrated covers and the establishment of patterns of influence of the complex technological process of finishing and strengthening treatment on the quality of the final product. Its relevance lies in the need to ensure high wear resistance and accuracy of the parts of the coordination and transport unit of the line for the manufacture of l covers. The smallest deviations in its work, which can be caused by wear of moving cylindrical parts, lead to slipping and displacement of workpieces when they are fed to the folding-gluing unit, and, as a consequence, displacement of seams and application of adhesive layer in unforeseen places. and products in general.

The author for the first time proposed a generalized logic diagram in the parametric form of modeling the processes of technological support of contour stability of covers and quality and operational properties of parts of the coordination and transport unit of the line for the manufacture of integrated covers.

For the first time, technological support has been developed that is able to improve the coordinate positioning when moving the covers through the coordination and transport unit with the simultaneous strengthening of the surfaces of its cylindrical parts.

For the first time, an analytical relationship between the parameters of microreliefs and technological modes of their formation has been established for the developed complex technology of formation of completely and partially regular microreliefs. This makes it possible to obtain the predicted parameters of the microrelief of the surface and, as a result, increase the wear resistance of parts of printing equipment and ensure the accuracy of positioning of the covers in the coordination and transport unit.

Regularities of formation of geometrical characteristics of a surface and physical and mechanical parameters of a near-surface layer at complex technological process of processing of details of the coordinating and transporting block, and also their influence on quality of covers are revealed.

The analysis of products produced on the line for the manufacture of integrated covers and identified key factors that affect the final quality

characteristics of finished products. The analysis showed that in addition to the properties of the source material, adhesives, etc., a significant role in creating quality products is played by the coordination and transport unit of the line, in particular its moving parts - steel shafts and pressure rollers, which ensure the accuracy of coordinate positioning of the original blanks. , accuracy of bends and processing by glue of the necessary zones.

The choice of materials is substantiated and conditions for theoretical and experimental researches on introduction of complex technology of finishing and strengthening processing (FSP) of surfaces of details of the coordinating and transporting block of the line for production of integral covers with the wide valve and maintenance of contour stability of the made production are resulted.

The research methodology for each stage of complex strengthening processing is developed: the list of technological equipment is given, its description, technical parameters, order and working conditions are given, the optimal operating modes for each technological process are established.

The measuring equipment and a technique of carrying out researches on definition of such basic qualitative characteristics of the processed samples, as geometrical parameters of a surface (roughness), hardness, wear resistance and their influence on final polygraphic production are offered.

Theoretical researches are carried out taking into account the basic analytical dependences of technology of polygraphic production, physical-mechanical and physical-chemical processes, materials science, statistical methods of control, structural-functional and system analysis.

Experimental studies were performed on the newly created experimental line for the manufacture of flexible covers with wide valves, on modern measuring and testing process equipment in laboratory and production conditions.

The author for the first time substantiated and developed a method of forming a combined regular microrelief on cylindrical surfaces of printing equipment parts, the implementation of which has a positive effect on the accuracy of coordinate positioning of binding material, and, consequently, the quality of

finished covers. The novelty of this method is protected by a patent for a utility model of Ukraine.

A complex technological process of finishing and strengthening processing of cylindrical moving parts of the coordination and transport block of the line for the production of integrated covers is proposed. A generalized control algorithm for such a complex technological process has been developed.

To establish the relationship in order to predict and further manage not only the contour stability but also the performance properties of parts, the author developed a generalized logic diagram of modeling processes of technological support of contour stability of covers and performance properties of cylindrical parts.

An analytical relationship between the processing modes (geometric parameters of the microrelief elements and the radius of the sphere of the deforming element) and the relative reference surface area is established. This allows by adjusting the parameters of the processing modes to obtain the optimal contact area of the working surfaces of the parts that are in direct contact with the binding material.

Based on theoretical and experimental studies, mathematical models are obtained, which are described by regression equations, due to controlled factors: radii of the deformation tool, indentation forces, feed rates in the first two stages of surface plastic deformation (SPD), nitrided layer thickness. The obtained models allow to predict the intensity of wear of the surface layers of cylindrical parts.

As a result of numerical modeling of the first two stages of complex processing, namely the process of vibration running-in and subsequent diamond smoothing, it is established that the maximum stress and strain is observed at the time of contact of the deformation tool with the part. When moving away from the point of contact, the values of stresses and strains decrease, approaching zero. The application of such a model for SPD processes allows to predict the properties of the surface layer of machined parts.

By studying the microstructure of steel samples, an increase in the strength characteristics of the surface layer of the metal and an increase in its hardness due to intragrain dislocation hardening, which is due to deformations propagating to

the depth of the material after the first two stages of complex FSP. Also, after the third stage of complex processing, a significant increase in surface hardness and gradient distribution of hardness to a depth of more than 600 μm in the near-surface layers, which is caused by the formation of nitride layer, resulting in additional strengthening of parts and increasing their wear resistance.

There was a significant increase in surface hardness and near-surface layers of parts after ionic nitriding in the plasma of the helicon discharge, without changing the microgeometry of the surface, due to the gradient formation of nitrides in the near-surface layers, which reaches a certain depth towards zero.

Studies of wear resistance have shown in a complex three-stage technological process of SPD increase the wear resistance of steel parts 45 in more than 4 times compared to the initial state and 2.5 times compared to the processing of FSP. It was found that coatings with higher microhardness have greater values of wear resistance.

The influence of complex technology on the qualitative parameters of the finished covers is determined. It is established that after its introduction the percentage of rejection of final products has significantly decreased (depending on the circulation). For example, for a circulation of 10,000 copies, the rejection rate decreased by 1.72%.

Keywords: printing equipment, flexible cover, hardening, vibration running-in, microhardness, nitriding, regular microrelief, wear resistance.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення дисертації опубліковані в 14 наукових працях, у тому числі 9 статей у фахових виданнях, з яких 3 статті у виданнях з переліку Міжнародної наукометричної бази даних Scopus, з них 2 статті у виданнях, які належать до фахових видань України категорії «А», 1 патент на корисну модель, 4 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

1. Rudenko E. M., Panarin V. Ye., Kyrychok P. O., Svavilnyi M. Ye., Korotash I. V., Palyukh O. O., Polotskyi D. Yu., and Trishchuk R. L., Nitriding in a Helicon Discharge as a Promising Technique for Changing the Surface Properties of Steel Parts, *Usp. Fiz. Met.*, 20, No. 3: 485–501 (2019). **(Фахове видання України категорії «А», входить до WoS та Scopus)**. Автором проаналізовано технології зміцнення, проведено дослідження інноваційної технології іонного азотування в плазмі геліконного розряду, оброблено експериментальні результати досліджень, побудовано діаграми.

2. O. Paliukh, P. Kyrychok, R. Trishchuk, M. Korobka, Ye. Dziadyk. Defining technological features in the manufacture of semi-hard book covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1 (106), 80–90 (2020). **(Фахове видання України категорії «А», входить до Scopus)**. Автором проведено теоретичні та експериментальні дослідження обробки деталей координувально-транспортувального блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок, запропоновано параметричну систему.

3. Руденко Е., Панарін В., Киричок П., Свавільний М., Короташ І., Полоцький Д., Тріщук Р. Зміцнення поверхні сталі 45 йонним азотуванням у геліконному розряді // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2018. Т. 40. № 8. С. 993–1004. **(Фахове видання України, входить до Scopus)**. Автором проведено аналіз досліджень зі зміцнення металевих поверхонь шляхом формування дифузійних покриттів, проведено експериментальні дослідження зміцнення сталевих зразків методом іонного азотування в геліконному розряді, доведено перспективність упровадження цього методу зміцнення.

4. Киричок П., Тріщук Р. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном // *Технологія і техніка друкарства*. 2017. № 3 (57). С. 4–19. Автором проведено аналітичний огляд методів зміцнення циліндричних металевих поверхонь деталей, запропоновано комплексну технологію оздоблювально-зміцнювальної обробки, зроблено висновки.

5. Тріщук Р. Підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання шляхом модифікації їх поверхонь методом іонно-плазмового азотування // Технологія і техніка друкарства. 2018. № 1 (59). С. 48–59.

6. Киричок П., Тріщук Р., Рибак О. Розрахунки відносної опорної площі циліндричних поверхонь деталей поліграфічного обладнання при комбінованому зміцненні віброобкатуванням // Технологія і техніка друкарства. 2018. № 3 (61). С. 4–13. *Автором запропоновано методичку розрахунків, проведено аналіз отриманих результатів, зроблено висновки.*

7. Тріщук Р. Алгоритм керування комплексним технологічним процесом зміцнення циліндричних сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання // Технологія і техніка друкарства. 2019. № 2 (64). С. 4–14.

8. Киричок П., Тріщук Р. Моделювання технологічного процесу двоетапної ОЗО циліндричних валів поліграфічного обладнання методом кінцевих елементів // Технологія і техніка друкарства. 2019. № 3 (65). С. 4–14. *Автором проведено аналіз отриманих результатів, зроблено висновки.*

9. O. Paliukh, P. Kyrychok, R. Trishchuk, M. Korobka, Research of changes of strength indicators of semi-rigid covers glued by modified adhesive compositions, Technology audit and production reserves, vol. 3, no. 1 (53), 27–31 (2020). *Автором проведено обробку результатів експериментальних досліджень методом математичної статистики.*

10. Пат. 129043 Україна, МПК (2006) B24B 39/00. Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин / П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, Р. Л. Тріщук ; заявник і власник КПП ім. І. Сікорського. № u 2018 00825; заявл. 30.01.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 6 с. *Автором запропоновано формулу корисної моделі, розроблено та відпрацьовано технологічні режими для двоетапного формування прогнозованих поверхневих характеристик циліндричних деталей поліграфічного обладнання.*

11. Киричок П. О., Тріщук Р. Л. Технологія забезпечення роботи лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном //

Друкарство молоде: тези доп. 16-ї Міжнар. наук.-техн. конф. студентів і аспірантів. Київ, 2016. С. 107–108.

12. Киричок П. О., Тріщук Р. Л. Удосконалення механічної лінії для виготовлення інтегральних обкладинок // Друкарство молоде: тези доп. 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф. студентів і аспірантів. Київ, 2017. С. 103–104.

13. Киричок П. О., Тріщук Р. Л. Удосконалення механічної лінії для виготовлення інтегральних обкладинок шляхом застосування інноваційного методу зміцнювальної обробки // Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. III Міжнар. наук.-техн. конф. Львів, 2018. С. 103–105.

14. Киричок П. О., Тріщук Р. Л. Комплексна технологія зміцнення деталей вузлів лінії для виготовлення інтегральних обкладинок // Друкарство молоде: тези доп. 19-ї Міжнар. наук.-техн. конф. студентів і аспірантів. – Київ, 2019. – С. 108–109.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	26
1.1. Інтегральні обкладинки з широкими клапанами. Будова та особливості виготовлення	27
1.2. Огляд літературних джерел та аналіз методів зміцнення циліндричних металевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання	32
1.2.1. Методи зміцнення поверхнево-пластичним деформуванням та їх особливості	33
1.2.2. Методи азотування та їх особливості	39
1.3. Тенденції досліджень і розробок у сфері підвищення якості та експлуатаційних властивостей сталевих деталей	43
Висновки до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	49
2.1. Експериментальне обладнання та методика проведення досліджень	49
2.2. Вибір матеріалів для зразків	58
2.3. Вимірювальне обладнання та методика проведення досліджень	60
2.3.1. Дослідження мікроструктури	60
2.3.2. Дослідження шорсткості	61
2.3.3. Дослідження твердості	64
2.3.4. Дослідження зносостійкості	67

2.3.5. Методика розрахункових досліджень методом кінцевих елементів с використанням CAD / CAE ANSYS	70
2.3.6. Дослідження тиражної стабільності обкладинок	71
Висновки до розділу 2	71
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	73
3.1 Розробка узагальненої логічної схеми моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок і експлуатаційних властивостей циліндричних деталей	73
3.2. Розробка комплексної технології поверхневого зміцнення циліндричних деталей поліграфічного обладнання	75
3.3. Встановлення аналітичних залежностей геометричних параметрів мікрорельєфу від параметрів технологічного процесу обробки	82
3.4. Алгоритм комплексного технологічного процесу поверхневого зміцнення циліндричних деталей поліграфічного обладнання	89
Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4. АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ КООРДИНУВАЛЬНО-ТРАНСПОРТУВАЛЬНОГО БЛОКУ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК З ШИРОКИМИ КЛАПАНАМИ	99
4.1. Багатофакторне планування експерименту	99
4.2. Моделювання процесу двохетапної обробки пластичним деформуванням методом кінцевих елементів	112
Висновки до розділу 4	120
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	121

5.1.	Дослідження мікроструктури поверхні деталей	121
5.2.	Вплив режимів обробки поверхнево-пластичним деформуванням на геометричні параметри мікрорельєфу поверхні	123
5.3.	Експериментальні дослідження шорсткості поверхні	128
5.4.	Дослідження режимів іонного азотування в плазмі геліконного розряду	131
5.5.	Дослідження твердості	134
5.6.	Дослідження зносостійкості поверхні циліндричних деталей поліграфічного обладнання	143
5.7.	Дослідження тиражної стабільності обкладинок	145
	Висновки до розділу 5	147
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	150
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	153
	ДОДАТКИ	169
	Додаток А. Таблиці статистичних характеристик, мультиколінеарності та залишків (по навчальній матриці) для математичних моделей Y , Y_1 , Y_2	170
	Додаток Б. Акт впровадження наукових розробок дисертаційної роботи у Видавництві «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського	179
	Додаток В. Акт впровадження основних положень дисертаційної роботи у ДП «Київська офсетна фабрика»	180
	Додаток Г. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у ДВ «Преса України»	181
	Додаток Д. Інструкція по технологічному процесу утворення мікрорельєфу на поверхні транспортувально-координуючого валу	182

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКТМ – алмазний композиційний термостабільний матеріал

ІО – інтегральна обкладинка

ОЗО – оздоблювально-зміцнювальна обробка

ППД – поверхнево-пластичне деформування

ПРМР – повністю регулярний мікрорельєф

РМР – регулярний мікрорельєф

ЧРМР – частково-регулярний мікрорельєф

a – товщина азотованого шару, мм

b – ширина нерівності після нанесення ЧРМР, мм

$D (d_3)$ – діаметр заготовки, мм

e – ексцентриситет деформувального інструмента, мм

h_1 – глибина нерівності після утворення ПРМР, мм

h_2 – глибина нерівності після утворення ЧРМР, мм

HRC – твердість матеріалу за Роквеллом

HV – твердість матеріалу за Віккерсом

h_H – висота напливів після нанесення ЧРМР, мм

i – відношення величини подвійних ходів деформувального інструмента

$n_{\text{подв.х}}$, до частоти обертання шпинделя $n_{\text{шп}}$

I – інтенсивність зношування, кг/м^2

l – довжина заготовки, мм

$n_{\text{подв.х}}$ – частота осциляцій інструмента, подв.х/хв

$n_{\text{шп}}$ – частота обертання шпинделя, об/хв

P – зусилля вдавлювання, Н

P_r – потужність генератора, Вт

Q – вагове зношення, мг;

R – радіус деформувального інструмента, мм

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм

R_z – висота нерівностей профілю по десяти точках, мкм

S – величина подачі, мм/об (або мм/хв)

$S_{\text{заг.}}$ – площа заглибини базового елемента без урахування рівнів перетину поверхні з РМР

S_n – площа рівнів перетину поверхні з РМР

$T_{\text{аз.}}$ – температура заготовки при азотуванні, °С

$T_{\text{аз.}}$ – час азотування, год

$H_{\text{осн.}}$ – мікротвердість основи, МПа

$H_{\text{аш}}$ – мікротвердість азотованого шару, МПа

α – кут сітки

ρ – загальна відносна опорна площа, %

Θ – кут напряду нерівностей

ВСТУП

Актуальність теми

До важливих технологічних відкриттів сучасності у виготовленні книжкових конструкцій слід віднести інтегральну обкладинку (ІО). Зростання її частки на ринку та витіснення інших конструкцій книжкових оправ зумовлені рядом характеристик, до яких належать такі як: технологічність, міцність з'єднання, легкість виготовлення та низька собівартість. У свою чергу, при виготовленні сучасної книжкової продукції, зокрема інтегральних обкладинок, які є її складовою частиною, за умов постійної конкуренції підвищуються вимоги до якості та термінів виготовлення кінцевого продукту. Дотримання перерахованих вимог можливе при точній безперебійній тривалій роботі вузлів поліграфічного обладнання та, зокрема, їх рухомих деталей, які утворюють пари тертя та піддаються значним навантаженням у процесі експлуатації. Оскільки якість інтегральної обкладинки значною мірою залежить від точності її вихідних геометричних характеристик, виникає необхідність забезпечення високої зносостійкості та точності роботи деталей координувально-транспортного механізму. Адже найменші відхилення в його роботі, які можуть бути спричинені зношуванням рухомих циліндричних деталей, призводять до проковзування та зміщення заготовок при подачі до фальцювально-склеювального блоку, і, як наслідок, відхилення фальців і нанесення клейового шару в непередбачених місцях негативно впливають на кінцеву якість обкладинки та продукції загалом.

До того ж, упродовж усього експлуатаційного терміну поліграфічного обладнання деталі вищезазначених вузлів постійно піддаються дії змінних циклічних навантажень і впливу агресивного середовища (паперовий пил, розчинники, клей, лак). Ці фактори спричиняють посилене зношування поверхонь тертя цих деталей.

Тому, зважаючи специфіку роботи рухомих деталей поліграфічного обладнання в умовах тертя кочення, виникає необхідність підвищення їх

строку служби та покращення критеріїв працездатності таких, як міцність, зносостійкість, корозійна стійкість. Крім цього, для забезпечення точності координування транспортувального механізму очевидно є необхідність удосконалення циліндричних поверхонь його деталей шляхом модифікації їх геометричних параметрів для отримання оптимальної опорної площі контактування та формування складного мікрорельєфу, який унеможливить зсуви та проковзування заготовок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі технології поліграфічного виробництва Видавничо-поліграфічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Робота безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями кафедри технології поліграфічного виробництва ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського та виконувалась одночасно з науково-дослідною роботою № 2212-п на тему «Теоретичні та практичні засади забезпечення якості металографічного друку» (наказ МОН України від 09.11.2018 р. №1223, Наказ КПІ ім. Ігоря Сікорського від 28.12.2018 р. № 2/346).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка комплексної технології утворення повністю- та частково регулярного мікрорельєфу з подальшим зміцненням приповерхневих шарів хіміко-термічним методом, та її вплив на параметри якості й експлуатаційні властивості поліграфічного обладнання, якість поліграфічної продукції, а також зв'язок між ними на основі узагальненої логічної схеми.

Відповідно до цієї мети сформульовано такі дослідницькі завдання:

1. Розробити комплексний технологічний процес для формування на циліндричних поверхнях деталей механізму координувально-транспортувального блоку повністю регулярного мікрорельєфу (ПРМР) та

частково-регулярного мікрорельєфу (ЧРМР) з подальшим зміцненням приповерхневих шарів фізико-хімічними методами.

2. Розробити алгоритм керування комплексним технологічним процесом оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь деталей поліграфічного обладнання для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами.

3. Встановити аналітичні залежності між технологічними факторами та геометричними параметрами мікрорельєфу поверхні циліндричних деталей поліграфічного обладнання.

4. На основі теоретичних та експериментальних досліджень змодельовати процес впливу режимів обробки й товщини модифікованого шару поверхні деталей на їх зносостійкість.

5. Встановити залежності фізико-механічних характеристик приповерхневого шару деталей від режимів їх обробки шляхом чисельного моделювання двохетапного процесу обробки поверхневим пластичним деформуванням.

6. Розробити узагальнену логічну схему моделювання технологічного забезпечення і взаємозв'язку якості та експлуатаційних властивостей деталей механізму координувально-транспортного блоку, а також показників якості обкладинок.

7. Результати дослідження запропонувати до впровадження в навчальний процес, а також у виробництво поліграфічної галузі.

Об'єкт дослідження – комплексний технологічний процес забезпечення якості та експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання при виготовленні інтегральних обкладинок.

Предмет дослідження – режими комплексної технології підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання, параметри повністю регулярного мікрорельєфу та частково-регулярного мікрорельєфу, фізико-механічні характеристики приповерхневого шару,

зносостійкість циліндричних деталей, а також їх вплив на показники контурної стабільності обкладинки.

Методи досліджень. Для розробки та обґрунтування комплексної технології підвищення зносостійкості циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами використовували системний підхід, який базується на проведенні ряду теоретичних і практичних досліджень.

Структуру поверхні деталей у початковому стані та після кожного етапу їх комплексної обробки досліджували за допомогою металографічного аналізу. Параметри шорсткості циліндричної поверхні деталей визначали механічним контактним методом, а твердість – методом Віккерса. Під час теоретичних досліджень зносостійкості застосовували метод багатофакторного планування експерименту з використанням регресійного аналізу для його моделювання. Експериментальне дослідження зносостійкості проводили ваговим методом на реальному виробничому обладнанні – на виробничій лінії для виготовлення обкладинок.

Для моделювання процесу обробки поверхневим пластичним деформуванням використано систему інженерного розрахунку CAD / CAE ANSYS, що реалізує метод кінцевих елементів.

Наукова новизна.

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливу науково-прикладну задачу розробки теоретичних і практичних засад технологічного забезпечення якості й експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання та якості кінцевої продукції при виготовленні інтегральних обкладинок.

Уперше:

- запропоновано узагальнену логічну схему в параметричному вигляді моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок та якості й експлуатаційних властивостей деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами;

- розроблено технологічне забезпечення, здатне покращити координатне позиціювання при переміщенні обкладинок через координувально-транспортний блок з одночасним зміцненням поверхонь його циліндричних деталей;

- для розробленої комплексної технології формування повністю регулярного мікрорельєфу і частково регулярного мікрорельєфу встановлено аналітичний взаємозв'язок між параметрами мікрорельєфів і технологічними режимами їх формування. Це дає змогу отримати прогнозовані параметри мікрорельєфу поверхні і, як наслідок, підвищити зносостійкість деталей поліграфічного обладнання та забезпечити точність позиціювання обкладинок у координувально-транспортному блоці;

- виявлено закономірності формування геометричних характеристик поверхні та фізико-механічних параметрів приповерхневого шару при комплексному технологічному процесі обробки деталей координувально-транспортного блоку, а також їх вплив на якість обкладинок.

Практичне значення роботи.

- Розроблено комплексний технологічний процес оздоблювально-зміцнювальної обробки циліндричних деталей поліграфічного обладнання та алгоритм для його реалізації.

- Розроблено узагальнену логічну схему, яка взаємопов'язує параметри контурної стабільності обкладинок, витратні поліграфічні матеріали, режими комплексного технологічного процесу, характеристики якості поверхонь деталей координувально-транспортного блоку, а також їх

експлуатаційні властивості, що дає можливість впливати на зазначені параметри й характеристики.

- Виявлено закономірності формування геометричних (параметри РМР) і фізико-механічних характеристик (твердість, залишкові напруження, мікроструктура) в результаті комплексного технологічного процесу обробки.

- Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень упроваджуються у виробництво в Державному видавництві «Преса України», ДП «Київська офсетна фабрика», видавництві «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського.

- Матеріали дисертації впроваджено в навчальний процес кафедри технології поліграфічного виробництва ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського. Їх використовують для підготовки лекційного матеріалу, практичних і лабораторних робіт з дисциплін «Методи і засоби автоматизованого проектування» і «Технологічні процеси механічної обробки деталей поліграфічних машин».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та практичні результати роботи, які виносяться на захист, отримані дисертантом особисто. У зареєстрованому в співавторстві патенті на корисну модель частка кожного автора є рівноцінною. У працях, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать основні ідеї проведених досліджень, їх реалізація та наукове обґрунтування.

Робота автора полягає в пошуку та аналітичному опрацюванню літературних джерел за темою дисертаційного дослідження, розробці методики теоретичних й експериментальних досліджень, їх безпосередній підготовці та проведенні, аналізі отриманих результатів, авторстві або участі в написанні наукових статей і тез доповідей. Дослідження проводили на кафедрі технології поліграфічного виробництва ВПІ. Режимом іонного азотування в плазмі геліконного розряду досліджували на спеціалізованій технологічній установці в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Апробація результатів дисертації

Результати дисертаційного дослідження оприлюднені автором у доповідях і повідомленнях на міжнародних і всеукраїнських наукових, науково-практичних конференціях: XVI, XVII, XIX міжнародна науково-технічна конференція студентів і аспірантів «Друкарство молоде» (м. Київ, 2016 р., 2017 р., 2019 р.); III, міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (м. Львів, 2018 р.).

Публікації

Основні положення дисертації опубліковані в 14 наукових працях, у тому числі 9 статей у фахових виданнях, з яких 3 статті у виданнях з переліку Міжнародної наукометричної бази даних Scopus, з них 2 статті у виданнях, які належать до фахових видань України категорії «А».

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Значна кількість деталей промислового обладнання працює за підвищених швидкостей, навантажень і температур. Щоб забезпечити їх довготривалу працездатність, зазвичай застосовують високоміцні сталі та сплави, а це вимагає значних витрат при використанні дорогих матеріалів та інструментів для обробки цих деталей. Нестача інструментів для обробки і дефіцит матеріалів призводять до погіршення якості продукції та зниження ефективності виробництва.

Щоб підвищити довговічність роботи деталей використовують різні технологічні методи і способи зміцнення їх поверхневого стану [1], передусім такі як: фізико-хімічна, термічна, хіміко-термічна обробка поверхонь деталей, гальванічне покриття, напилення і наплавка поверхонь, електроіскрове легування, поверхневе пластичне деформування тощо [2]. У поліграфічному машинобудуванні їх застосовують для виготовлення і вдосконалення деталей друкарського обладнання задля підвищення якості та покращення експлуатаційних властивостей вузлів і деталей, що, у свою чергу, підвищує їх надійність і термін служби.

Оскільки ресурс роботи лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами визначається ступенем опору деталей машин, що піддаються різним видам контактної взаємодії, то покращити їх технічні характеристики можна завдяки підвищенню якості й експлуатаційних властивостей циліндричних поверхонь, які контактують.

Надійність лінії для виготовлення інтегральних обкладинок та якість готової поліграфічної продукції мають пряму залежність від стабільної роботи вузлів тертя у кожному з її блоків. Формування стабільного регулярного мікрорельєфу з одночасним зміцненням поверхневих шарів дає змогу підвищити термін служби циліндричних деталей лінії та їх експлуатаційні властивості. Це безпосередньо має позитивний вплив на

якість кінцевої продукції завдяки зменшенню або уникненню таких негативних явищ, як проковзування чи перекіс заготовок при транспортуванні від самонакладу до склеювально-фальцювального блоку, що, як наслідок, призводить до нерівномірного та неточного нанесення клейового шару.

У зв'язку з цим актуальним є вивчення та розробка технологічних процесів покращення якості та експлуатаційних властивостей циліндричних деталей лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами.

1.1. Інтегральні обкладинки з широкими клапанами. Будова та особливості виготовлення

Сучасні книжкові оправи за конструкційною особливістю поділяються на палітурки та обкладинки [3]. Особливістю деяких видів обкладинок, зокрема інтегральних, є те, що їх виготовлено з однієї суцільної деталі, висіченої з палітурного матеріалу. ІО є покращеним варіантом простої обкладинки, від якої вона відрізняється наявністю на полях країв (шириною 7–12 мм), які загнуті та приклеєні до її основної площини. Завдяки цим краям підвищується контурна міцність інтегральних обкладинок (рис. 1.1 а,б) [4].

Інтегральна обкладинка є важливим технологічним відкриттям у сучасному книговиробництві та має великі перспективи. Її використання охоплює значний сегмент на сучасному ринку книжкової продукції. З такими обкладинками здебільшого виготовляють наукову та художню літературу, шкільні підручники, навчальні посібники та іншу книжкову продукцію масового вжитку. Зовні книги з ІО не відрізняються від книг з класичною жорсткою обкладинкою, але технологічний процес їх виготовлення є більш простим та економічнішим.

Враховуючи переваги та недоліки відомих типів обкладинок було впроваджено інтегральну обкладинку з широкими клапанами [5], суттєва

перевага якої полягає в подвійному шарі палітурного матеріалу. Цей шар формують широкі клапани, приклеєні по всій площині інтегральної обкладинки (рис.1.1 в, г). Завдяки такій конструкції досягається суттєве підвищення контурної міцності.

Таким чином, інтегральні обкладинки з широким клапаном за характеристиками міцності та довговічності не поступаються твердим книжковим оправам, і мають при цьому меншу на 12–15 % масу [4] та низьку собівартість.

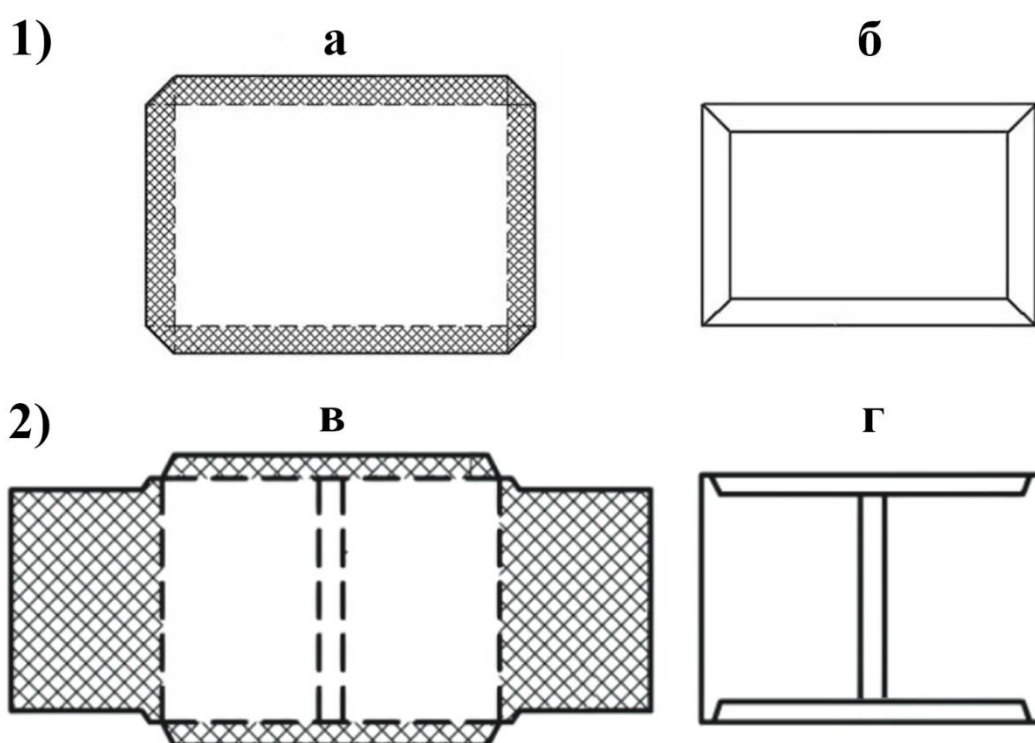


Рис. 1.1. 1) Інтегральна обкладинка: а – зовнішній контур, б – з приклеєними краями. 2) Інтегральна обкладинка з широкими клапанами: в – зовнішній контур, г – з приклеєними краями та клапанами [5].

Для серійного виробництва цього типу обкладинок спроектовано та введено лінію для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами [5]. Серія послідовно розташованих секцій з автономними

приводами дозволяє із завантажених у самонаклад заготовок в безперервному режимі отримувати готову продукцію.

Технологічний процес виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами проходить у декілька етапів: спершу формують заготовки шляхом висікання контуру з палітурного матеріалу при одночасному бігуванні ліній згину, після чого загинають і приклеюють клапани до внутрішньої площини обкладинки. Таким чином, заготовки завантажують у самонаклад (накопичувач заготовок з коливальним механізмом каскадного поштучного їх відокремлення), з якого вони далі рухаються через координувально-транспортувальний блок до фальцювально-склеювальної секції, де проходить завершальна стадія створення готової обкладинки (нанесення клеєвого шару на клапани, фальцювання, попереднє та залишкове пресування).

Завершена ІО з широкими клапанами повинна мати точні геометричні параметри в межах допустимих розмірних відхилень [4]: однакову довжину протилежних сторін і прямі кути між суміжними сторонами. Інакше з'єднання обкладинки з книжковим блоком буде супроводжуватись утворенням кантів з відхиленнями, що, в свою чергу, призведе до формування неякісного виробу, який надалі підлягатиме вилученню з тиражу.

Дотримання геометричної точності та однорідності готових інтегральних обкладинок з широкими клапанами значною мірою залежить від точності координатного позиціювання заготовок на вході фальцювально-склеювальної секції. За цю операцію відповідає координувально-транспортувальний блок лінії (рис. 1.2).

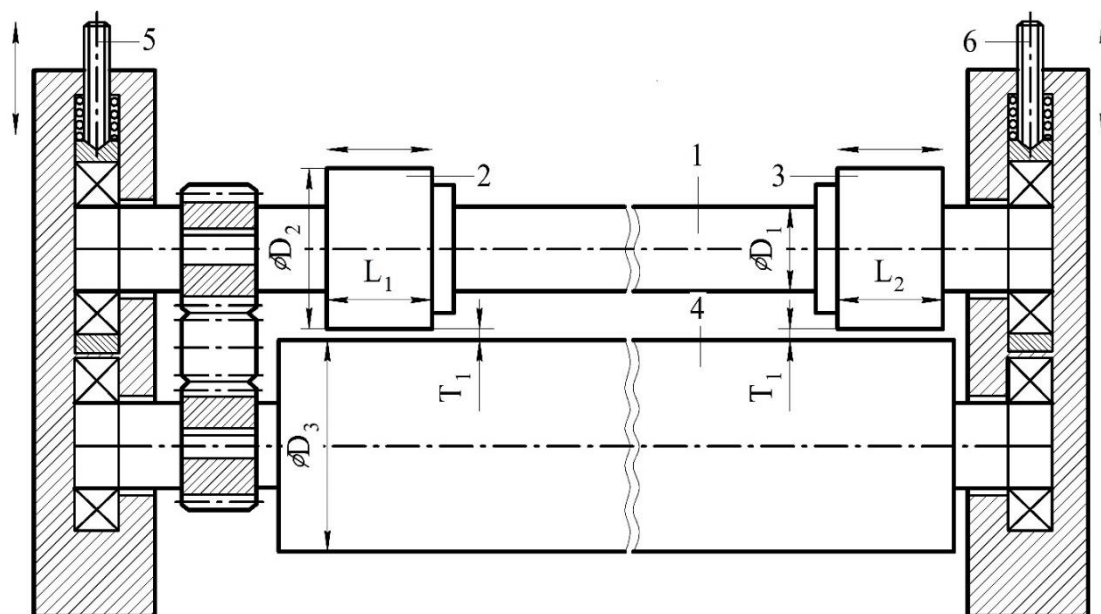


Рис. 1.2. Координувально-транспортний блок лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами: 1 – привідний вал притискних роликів; 2, 3 – притискні ролики з фіксованими лінійними переміщеннями; 4 – привідний опорний вал; 5, 6 – механізми регулювання зазорів для обертового пресування обкладинок; T_1 – регульовані зазори [4]

Притискні ролики (2, 3) діаметром D_2 закріплені на привідному валі (1), діаметром D_1 , і мають однакову товщину ($L_1=L_2$). Ролики можна переміщувати вздовж привідного валу та фіксувати залежно від формату обкладинки.

Опорний силовий вал (4), діаметром D_3 приводиться в обертальний рух автономним приводом координувально-транспортного блоку. Автономний привід забезпечує варіювання швидкості блоку в широких межах. Механізми регулювання зазорів T_1 (5, 6) обертового пресування притискними роликами забезпечують дотримання розмірів впродовж усього тиражного циклу [4].

Зона контакту валу та роликів з палітурним матеріалом проходить по прямій лінії. При поступовому зношуванні поверхонь роликів чи валу ця зона контакту зменшується, що призводить до зниження точності координатного

позиціювання обкладинок у фальцювально-склеювальну секцію (мають місце проковзування та перекося палітурного матеріалу). Як наслідок, виникає висока ймовірність неточного нанесення клеєвого шару, зміщення при пресуванні і, відповідно, геометричні характеристики кінцевого виробу перевищують межі допустимих розмірних відхилень.

Швидке зношування поверхонь циліндричних деталей координувально-транспортного блоку (рис. 1.3) обумовлене значними динамічними навантаженнями, які впливають на них у процесі транспортування та пресування на високих швидкостях. Також має місце корозійне руйнування, оскільки вал і ролики контактують з поверхнею палітурного матеріалу із нанесеним клеєвим прошарком.

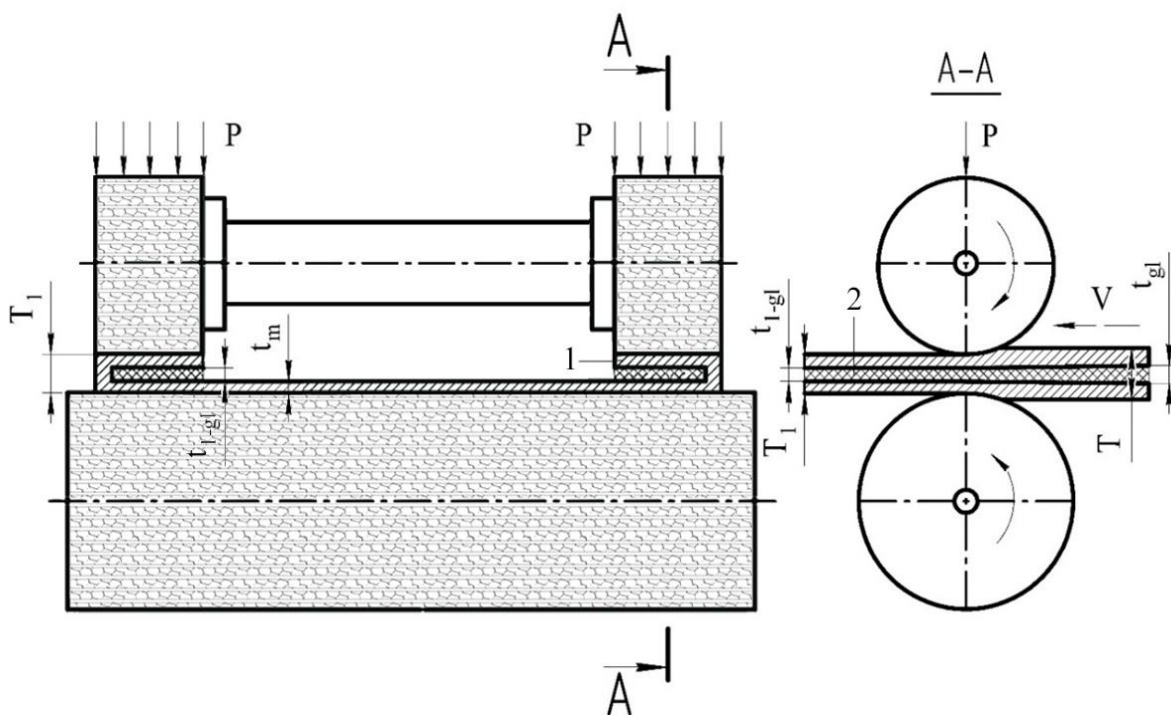


Рис. 1.3. Циліндричні пари координувально-транспортного блоку при пресуванні країв обкладинки

У зв'язку з цим актуальною є розробка комплексного технологічного процесу, який підвищить експлуатаційні властивості деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами та забезпечить високу точність координатного позиціювання палітурного матеріалу.

1.2. Огляд літературних джерел та аналіз методів зміцнення циліндричних металевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання

У сучасному машинобудуванні, і в поліграфічному зокрема, використовують різні способи покращення експлуатаційних властивостей металевих поверхонь шляхом їх зміцнювальної обробки.

До них належать фізичні, хімічні, фізико-хімічні, хіміко-термічні, термічні та інші методи як-от:

- 1) зміцнення поверхонь шляхом поверхневого пластичного деформування (ППД) [6–20];
- 2) зміцнення поверхонь фізичними методами [21; 22];
- 3) фізико-хімічні методи зміцнення поверхонь [23–27];
- 4) термічні та кріогенні методи [8; 28];
- 5) поверхневе хіміко-термічне зміцнення [8; 29–32].

Кожен із цих методів має ряд переваг і недоліків і може застосовуватися як у комплексі, так і вибірково. Суттєвого підвищення надійності роботи деталей друкарського обладнання можна досягти завдяки використанню методів, які поєднують зміцнювальні та оздоблювальні технології, що включають нанесення антикорозійних та інших видів покриття [9]. Застосування будь-якого із цих методів зазвичай супроводжується тими чи іншими обмеженнями щодо специфіки роботи деталей, їх фізико-хімічного складу та економічної доцільності застосування. Деякі з цих методів обробки поверхонь металевих деталей шляхом їх зміцнення можуть бути застосовані також і в поліграфічній галузі.

Вибір доцільного методу обробки циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами, враховуючи умови експлуатації деталей та специфіку їх роботи, звужується до небагатьох існуючих, які здатні забезпечити необхідні параметри поверхні деталей. Комбінування ж цих методів шляхом розробки комплексної технології

зміцнення дозволить досягти бажаних результатів поетапним формуванням необхідних експлуатаційних властивостей.

1.2.1. Методи зміцнення поверхнево-пластичним деформуванням та їх особливості

З огляду на вищеперераховані фактори, для початкових етапів комплексної обробки циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами були обрані для подальшого розгляду методи ***поверхневого пластичного деформування (ППД)***. До методів ППД належать вібраційна обробка (накатування профільним роликом, вібраційне та вібродинамічне накатування), дорнування, вигладжування надтвердими матеріалами, дробоструменева обробка, розкатування та обкатування, електромеханічна пластична обробка та карбування.

Вібродинамічне накатування — процес утворення регулярних заглиблень, в основі якого лежить холодне пластичне деформування. Особливістю цього способу зміцнення є поєднання розкатувальної дії, яка характерна для більшості способів поверхневого пластичного деформування, з ударною дією. У результаті суміщення зазначених дій зростає частка залишкової деформації робочої поверхні, а це істотно її зміцнює як за ступенем, так і за глибиною залягання зміцненого шару металу. Режим вібродинамічного накатування визначається такими параметрами, як частота обертання диска з кульками, подача, кількість подвійних ходів, амплітуда [10]. Незважаючи на те, що «цей спосіб вважають універсальним і продуктивним, він має окремі вади, до яких слід віднести дискретний характер утворюваних заглиблень, що погіршує умови протікання мастил, односторонній динамічний вплив на заготовку й елементи верстата, що обмежує його застосування для обробки мало- і нерівножорстких деталей, призводить до зниження жорсткості верстатів, появи шуму» [33].

Накатування профільним роликом – спосіб зміцнення, що ґрунтується на перенесенні мікрорельєфу інструмента-ролика на заготовку. Тобто мікрорельєф видавлюється на вузькій ділянці поверхні деталі, яка не перевищує ширини ролика [13]. Основною перевагою цього способу є висока продуктивність, але із-за дороговизни і складності виготовлення інструменту та обхідності застосування значних зусиль при обробці, сфера застосування цього методу зміцнення обмежується лише серійним і великосерійним виробництвами відносно малотвердих сталей.

Вигладжування надтвердими матеріалами – метод зміцнювальної обробки робочої поверхні деталі ковзанням по ній інструментом-вигладжувачем, який спричиняє її пластичне деформування. У результаті попередньої обробки поверхні нерівності, які на ній залишилися, повністю або частково згладжуються. Деталь набуває дзеркального блиску, у поверхневому шарі утворюються стискувальні залишкові напружки, змінюється мікроструктура, підвищується твердість і формується направлена структура-текстура. Поверхня стає чистою, не шаржованою осколками абразивних зерен. Поєднання таких якостей вигладженої поверхні зумовлює її високі експлуатаційні властивості, передусім – стійкість проти зношування, опір утомленості тощо [33].

На шорсткість поверхні при вигладжуванні надтвердими матеріалами суттєво впливають зусилля вигладжування, подача та радіус робочої частини інструмента. У результаті пластичної деформації при алмазному вигладжуванні зміцнюється поверхневий шар металу, зокрема збільшується твердість, межа пружності та текучості, проте зменшується його пластичність [12; 20].

Недолік методу зміцнювальної обробки робочої поверхні деталі – низька продуктивність обробки, яку здійснюють доволі вузькими поздовжніми або поперечними рядками (шириною близько 0,1 мм). Підвищенню ефективності алмазного вигладжування заважає прямопропорційна залежність температури в зоні контакту від швидкості процесу. Тому вивчення того, як впливають параметри режиму обробки на

стійкість інструмента й енергосилові характеристики процесу, є важливим завданням.

Розкатування та обкатування – зміцнювальний метод для обробки циліндричних зовнішніх і внутрішніх, наскрізних і глухих поверхонь, бокових поверхонь черв'яків, галтелей, ступінчастих, колінчастих і шліцьових валів, які виготовлені із чавунів, сирих і загартованих сталей та кольорових сплавів. Метод передбачає використання обкатувальних кульок, роликів та інших деформувальних інструментів, які закріплені в інструментах і пристроях токарних, свердлильних та інших верстатах [33].

У зв'язку з тим, що кулькові розкатні й обкатні пристрої дають змогу інтенсифікувати пластичну деформацію за менших зусиль обкатування, їх можна використовувати в поліграфічному машинобудуванні для обробки твердих матеріалів і деталей з малою жорсткістю. Для обробки малогабаритних поверхонь та отворів малого діаметру добре підходять пристрої з обкатними шариками.

Основні недоліки цього методу – необхідність точної попередньої обробки заготовок і врахування зминання мікронерівностей та зміни остаточного розміру деталі. Крім цього, із-за численних проходів інструмента та надмірного тиску відбувається руйнування поверхні шляхом відшарування її окремих ділянок. До недоліків обкатування варто віднести: невелику абсолютну величину залишкових напружень; обробку при малих подачах (0,06–0,47 мм/об), що збільшує час зміцнення; залежність якості обробки від властивостей оброблюваного матеріалу, стану вихідної поверхні та режимів обкатування [33].

Дробоструменева обробка – метод зміцнення поверхневого шару деталі пластичним деформуванням із застосуванням прямої ударної дії мікрокульок дробу, поданих струменем на великій швидкості. Твердість дробу, при цьому, повинна бути більшою, ніж твердість оброблюваного матеріалу. На ступінь зміцнення деталей цим методом впливають:

- швидкість дробу при зустрічі з оброблюваною поверхнею;

- розмір, якість і витрати дробу;
- тривалість обробки;
- напрям струму дробу – кут атаки;
- щільність, з якою дріб покриває оброблювану ділянку поверхні;
- відстань оброблюваної поверхні від місця вильоту дробу та фізико-механічні властивості металу оброблюваної деталі.

Цей вид зміцнення придатний для обробки деталей та інструментів складної конфігурації. При цій обробці розміри заготовок фактично не змінюються і залишаються в межах допуску [8]. Серед недоліків дробоструменевої обробки можна виділити нагрівання деформованої поверхні від ударів твердих дробинок, які летять з великою швидкістю, невелику глибину зміцнення, невисоку щільність і рівномірність потоку дробу, які впливають на суцільність та однорідність зміцнення, а також нерегулярність утворення мікрорельєфу на поверхні. Крім цього, метод зміцнення поверхонь вимагає спеціалізованого обладнання.

Найбільш універсальним методом зміцнення поверхневого шару металу з одночасним утворенням на поверхні регулярних мікрорельєфів є *вібраційне обкатування*, яке базується на дрібноструктурному пластичному деформуванні поверхневих шарів оброблюваної деталі та складному переміщенні її і деформувального елемента. Залежно від цільового призначення способи нанесення регулярних мікрорельєфів поділяють на дві групи, а саме: 1) ті, за допомогою яких на поверхні утворюється частково регулярний мікрорельєф, і 2) ті, що дозволяють утворювати новий повністю регулярний мікрорельєф.

У першому випадку на поверхні деталі утворюються дискретно розташовані або безперервні заглиблення, між якими зберігається вихідна шорсткість; у другому – появляється повністю новий мікрорельєф з однаковими за взаємним розташуванням формою і висотою нерівностями. Вібраційне накатування найбільше використовують при обробці внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь. Для режиму віброобкатування характерні такі

параметрами: діаметр заготовки; частота її обертання; подача деформувального елемента за один оберт заготовки; кількість осциляцій деформувального елемента; амплітуда осциляцій; зусилля вдавлювання деформувального елемента; радіус сфери деформувального елемента [6; 7; 17].

Цей метод дозволяє зменшити шорсткість, отримати потрібні параметри мікрорельєфу, задану глибину зміцнення поверхневого шару і мікротвердість поверхні. Вібраційне накатування не тільки забезпечує необхідні параметри мікрорельєфу і підвищує якість поверхневих шарів, воно також покращує фізико-механічні й експлуатаційні властивості та геометричні параметри робочих поверхонь циліндричних деталей поліграфічного обладнання [15].

Серед недоліків методу вібронакатування можна виділити значну складність обробки внутрішніх та фасонних поверхонь.

Комбіновані методи обробки. Останнім часом у більшості досліджень не обмежуються одним із вищевказаних методів обробки, і, для досягнення необхідних властивостей поверхневих шарів деталей, застосовують комбінування технологічних процесів поверхневої обробки. Поєднання таких технологій дозволяє досягти більш високих показників якості поверхні за рахунок ширших можливостей варіювання параметрами на кожному з етапів технології поверхневої обробки.

Так, у роботах [9; 34; 35] представлено комплексний технологічний процес утворення частково регулярного мікрорельєфу вібраційним обкатуванням поверхні з подальшим її хромуванням. Запропонована технологія забезпечує значне підвищення зносостійкості циліндричних деталей поліграфічного обладнання. Розроблена технологія може забезпечити стабільну подачу паперу або картону при виготовленні обкладинок.

У роботах [36; 37] розроблено спосіб обробки циліндричних поверхонь деталей поліграфічного обладнання у два етапи. На першому етапі утворюють частково регулярний мікрорельєф. На другому етапі зменшують зусилля вдавлювання деформувального інструмента, а також інші параметри

технологічного процесу та утворюють повністю регулярний мікрорельєф на циліндричній поверхні. Запропонована технологія підвищує зносостійкість деталей поліграфічного обладнання, але не забезпечує подачу паперу при впровадженні її для валів лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами.

Проаналізовано технології утворення частково регулярного мікрорельєфу оздоблювально-зміцнювальною обробкою [38]. На першому етапі оздоблювально-зміцнювальної обробки утворюють регулярний мікрорельєф чотирикутного типу. На другому етапі поверхню шліфують чашковим алмазно-абразивним кругом. У результаті цієї операції знімаються напливи, утворені на першому етапі. Технологію утворення частково регулярного мікрорельєфу оздоблювально-зміцнювальною обробкою застосовують до плоских поверхонь деталей поліграфічного обладнання. Відсутність напливів не забезпечить стабілізацію подачі паперу.

У роботі [39] запропоновано технологію утворення повністю регулярного мікрорельєфу на циліндричній поверхні деталі, яка здійснює обертання з постійною швидкістю за дві технологічні операції. На першій технологічній операції поверхневим пластичним деформуванням отримують повністю регулярний мікрорельєф на поверхні друкарського циліндра. На другій технологічній операції поверхню друкарського циліндра піддають хромуванню. Зазначена технологія підвищує зносостійкість друкарського циліндра в 2,5-2,8 рази і може збільшити площу контакту протилежних пластин. Відхилення від круглості задовольняє технічні умови до друкарського циліндра. В той же час циліндрична поверхня з гексагональним мікрорельєфом не може покращити зчеплення з папером чи картоном під час його подачі при виготовленні інтегральних обкладинок з широкими клапанами.

У роботі [40] подано технології формування частково регулярного мікрорельєфу на циліндричних і плоских поверхнях оздоблювально-зміцнювальною обробкою. Відносна площа мікрорельєфу, утворена регулярними нерівностями, знаходиться в межах 25%...30%. Розроблені

технології використовуються для збільшення довговічності деталей у верстатобудівній і машинобудівній промисловості, а також для зменшення часу припрацювання і покращення плавності руху пар тертя.

У роботі [41] для обробки важкодоступних поверхонь деталей машин і механізмів розроблено технологію утворення мікрорельєфу, в якій використовується випромінювання двох лазерних установок. Випромінювання основної лазерної установки зміцнює ділянки поверхні навколо мікролунок. Випромінювання додаткової лазерної установки утворює на поверхні деталі ЧРМР у вигляді мікролунок. Запропонована технологія покращує геометричні і фізико-механічні параметри поверхні, а також зносостійкість деталі. Однак, упровадження цієї технології неможливе для цілеспрямованої подачі матеріалу для виготовлення обкладинок.

Проаналізувавши вищевказані технологічні процеси, пристрої та деформувальні інструменти, а також можливість і доцільність їх застосування, зважаючи на переваги та недоліки кожного з них, для початкового етапу комплексної технології зміцнення обрано метод вібраційного обкатування.

1.2.2. Методи азотування та їх особливості

Існує значна кількість технологій підвищення експлуатаційних властивостей приповерхневого шару металів. Серед таких – методи хіміко-термічної обробки матеріалів, в яких поверхню металевих деталей піддають насиченню іншими елементами з використанням дифузійного проникнення [42]. Поверхня такого зразка покривається новим шаром, який суттєво відрізняється від серцевини деталі за складом, структурою та механічними властивостями.

Цементация, нітроцементация та азотування є основними способами підвищення міцності деталей машин та агрегатів шляхом поверхневого зміцнення. Останнім часом найбільше використовують азотування – процес хіміко-термічної обробки матеріалів, який полягає в насиченні поверхневого шару зразка азотом. Він сприяє високій зносостійкості та твердості

поверхневого шару деталей. Після азотування заготовка стає твердішою, більш зносостійкою, підвищуються її контактна витривалість, корозійна стійкість. Крім очевидних плюсів, цей метод модифікування поверхні сталевих зразків має також і недоліки. Це:

- довготривалий дифузійний процес;
- застосування аміаку, водню та інших вибухонебезпечних і отруйних газових сумішей;
- значні енергозатрати (електроенергія, вода, гази тощо) [42].

Технологія іонно-плазмового азотування застосовується на заключному етапі обробки деталей, є доволі простою, екологічно безпечною та економічною [43]. Ці переваги обумовлюють істотне розширення застосування іонно-плазмового азотування в різних галузях виробництва машин і механізмів.

Для проведення азотування необхідно враховувати вплив попередньої термічної обробки на розмір зародків нітриду заліза на поверхні деталі. У роботі [44] показано, що режими попередньої термічної обробки металевої заготовки суттєво впливають на її поверхневу структуру та властивості утвореного покриття. Таким чином, при кожній температурі обробки утворюється своя структура, яка характеризується певними механічними властивостями зразка. Автори [45] вивчали, як на механічні властивості азотованих сталевих зразків впливають розміри фаз нітриду заліза, їх густина, характер розподілу та хімічний склад. У [46] показано, що під час дифузійного насичення сталевих зразків на їх поверхні відбувається формування структур, подібне до розпаду пересичених твердих розчинів у сплавах, в яких триває процес старіння. Залежно від складу сталевих зразків та від температури азотування можуть утворюватися такі види нітридних структур:

- структура з одношарових зародків нітридної фази, що когерентні з кристалічною ґраткою матриці;

- структура з частковою когерентністю нітридної фази (розмір нітридів складає 2-4 нм);
- структура з порушеною когерентністю нітридної фази (розмір нітридів 10 нм).

Азотування сталевих деталей відбувається при нагріванні шляхом дифузійного насичення її поверхні азотом. Процес азотування складається з трьох основних етапів:

- створення газової фази, насиченої активним азотом;
- адсорбція атомів азоту поверхнею сталевих заготовок;
- дифузія атомів азоту в метал.

Здатність матеріалу змінювати свої властивості при поглинанні атомів азоту залежить від:

- чистоти поверхні сталевих заготовок;
- мікрорельєфу поверхні;
- хімічного складу приповерхневого шару;
- мікроструктури приповерхневого шару.

Найбільше на процес азотування впливає те, до якого типу сталей належить зразок: до конструкційних, інструментальних, феритних, перлітних, аустенітних чи жаростійких [47].

З метою пришвидшення процесів активації в газовому середовищі та збільшення поверхні азотування застосовують іонне азотування, яке суттєво скорочує тривалість процесу (до трьох разів), значно поліпшує якість поверхні виробу [48]. Іонне азотування проводять у сталевій камері, яка слугує одночасно анодом, а катодом виступає деталь, яка піддається азотуванню. В евакуйовану до низького тиску камеру, де має проходити азотування, подається азотовмісна газова суміш. Спочатку поверхню деталі очищують катодним розпиленням у розрідженому азотовмісному газі або водні. За напруги 1000 В і тиску 13,33 Па іони газу бомбардують поверхню деталі й очищують її, поверхня катода нагрівається до 200 °С, після цього встановлюють робочий режим з напругою 300-800 В. Поверхня деталі-катода

в результаті бомбардування позитивно зарядженими іонами газу нагрівається до температури 450 °С. Іони азоту поглинаються поверхнею катода та дифундують углиб заготовки. Процес катодного розпилення на поверхні дозволяє проводити азотування сплавів, які важко піддаються азотуванню та покриваються захисною оксидною плівкою [42].

При іонному азотуванні головними й незалежними параметрами процесу, від яких залежить якість новоствореного шару, є температура, тиск і склад газового середовища. Напруга й густина струму також мають вплив на процес, але не так суттєво [49]. Слід зазначити, що при пічному азотуванні зона дифундування просувається вглиб зразка й утворює нітридну сітку в дифузійному підшарі, а в нітридній зоні виникають пори. При іонному азотуванні нітридна зона на всій глибині не має пор [50].

Сьогодні недостатньо дослідженим, але доволі перспективним є метод іонного азотування в безводневому середовищі з використанням високочастотного геліконного джерела плазми. У цьому напрямі нами проводились дослідження на базі Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, де була створена спеціалізована технологічна установка для прецизійного іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок в єдиному вакуумно-технологічному циклі [51], яка була переналаштована під процес азотування. Метод азотування в безводневому середовищі в плазмі геліконного розряду має ряд переваг перед вищезгаданими методами, таких як:

- збільшення густини плазми й концентрації атомів, що розпилюються;
- зменшена енерговитратність;
- розширений діапазон регулювання параметрів технологічного процесу;
- єдиний технологічний цикл очищення заготовки з подальшим азотуванням;
- значне скорочення тривалості технологічного процесу.

Попередній комплекс досліджень на циліндричних деталях поліграфічного обладнання показав, що геометричні параметри мікрорельєфу залишаються стабільними після застосування іонного азотування у високочастотному геліконному розряді, при цьому середня тривалість повного технологічного процесу скоротилась у 10 разів порівняно з іонним азотуванням в тліючому розряді з аналогічними результатами збільшення мікротвердості поверхневого шару на певну глибину.

Отже, аналіз сучасних способів хіміко-термічної обробки азотуванням показує перспективність дослідження та застосування методу іонного азотування у високочастотному геліконному розряді в безводневих середовищах для зміцнення сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання з огляду на його переваги над іншими методами. Таким чином, вищевказаний метод в подальшому буде розглядатись та досліджуватись в якості завершального етапу технології комплексного зміцнення деталей поліграфічного обладнання.

1.3. Тенденції досліджень і розробок у сфері підвищення якості та експлуатаційних властивостей сталевих деталей

Для створення якісного обладнання в поліграфічному виробництві насамперед потрібно використовувати деталі й агрегати з підвищеною міцністю, надійністю та довговічністю. Боротьба з дочасним зношуванням деталей набуває нових і ширших масштабів не тільки в поліграфічному виробництві, а й в інших галузях металообробки та машинобудування [42].

Проведено патентний пошук за останні 20 років (період: з 2000 р. – до квітня 2019 р. включно), у результаті якого знайдено понад 6500 патентів за класами B24B 39/00, C21D 7/04, B23P 9/04 відповідно до Міжнародної класифікації, що включають такі напрями досліджень (надалі в діаграмах позначимо їх як «зміцнення ППД»):

- Змінювання фізичних властивостей заліза або сталі шляхом деформування холодним оброблянням поверхні.

- Верстати або пристрої для обкочування (з натискними елементами, необхідними для ущільнювання поверхневого шару).
- Технологічне або чистове обробляння за допомогою кування або повторюваного прикладання тиску.

Також знайдено понад 120000 патентів, отриманих за вищевказаний період, які декларували винаходи / корисні моделі за класами (один з перелічених, або декількома) C23C 8/38, C23C 8/06, C23C 8/26, C23C 8/50, C23C 14/00, C23C 14/48 відповідно до Міжнародної патентної класифікації, що включають напрями досліджень:

- Дифундування у твердому стані тільки неметалевих елементів у металеву поверхню.
- Хімічне обробляння поверхні металевого матеріалу шляхом взаємодії поверхні з реакційним газом, причому продукти реакції поверхневого матеріалу залишаються в покритті, наприклад конверсійні покриття; використанням іонізованих газів, наприклад іоноазотування.
- Обробляння сталевих поверхонь з використанням газів.
- Покриття вакуумним випаровуванням, розпилюванням металів або іонною імплантацією матеріалу, що утворює покриття розрядом змінного електричного струму, наприклад високочастотним розрядом; іонна імплантація.
- Дифузійне обробляння металевого матеріалу: способи покриття вакуумним випаровуванням, розпилюванням, іонною імплантацією або хімічним осадженням парів.

Досліджено тенденції розвитку технологій та обладнання для зміцнення металевих поверхонь пластичним деформуванням та модифікації приповерхневих шарів металу шляхом хіміко-термічної обробки іонним азотуванням.

Установлення меж з 2000 р. по 2019 р. зумовлене тим, що більшість розробок, опублікованих до цього часу, на сьогодні вже застаріли.

Вибірку встановлено максимально широку: Японія, Англія, Франція, Болгарія, Австралія, Австрія, Бразилія, Канада, Китай, Данія, Південна Корея, Мексика, Норвегія, Польща, Румунія, Сінгапур, Україна, Росія, США, Португалія, Ізраїль, Іспанія, Куба, Німеччина.

Джерелами пошуку були:

- 1) Всесвітня організація інтелектуальної власності (WIPO) [52];
- 2) патенти США – United States Patent and Trademark Office (USPTO) [53];
- 3) Європейський патентне відомство (European Patent Office) (EPO) [54];
- 4) Державне підприємство «Український інститут промислової власності» (Укрпатент) [55];
- 5) Євразійська патентно-інформаційна система (EAPATIS) [56];
- 6) німецьке відомство з патентів і товарних знаків – Deutschen Patent- und Markenamtes (DPMA) [57];
- 7) патентна база даних Японії – Industrial Property Digital Library [58].

Вибірку створено за даними перших чотирьох джерел, так як в наступних інформація зазвичай дублюється (рис. 1.4–1.7).

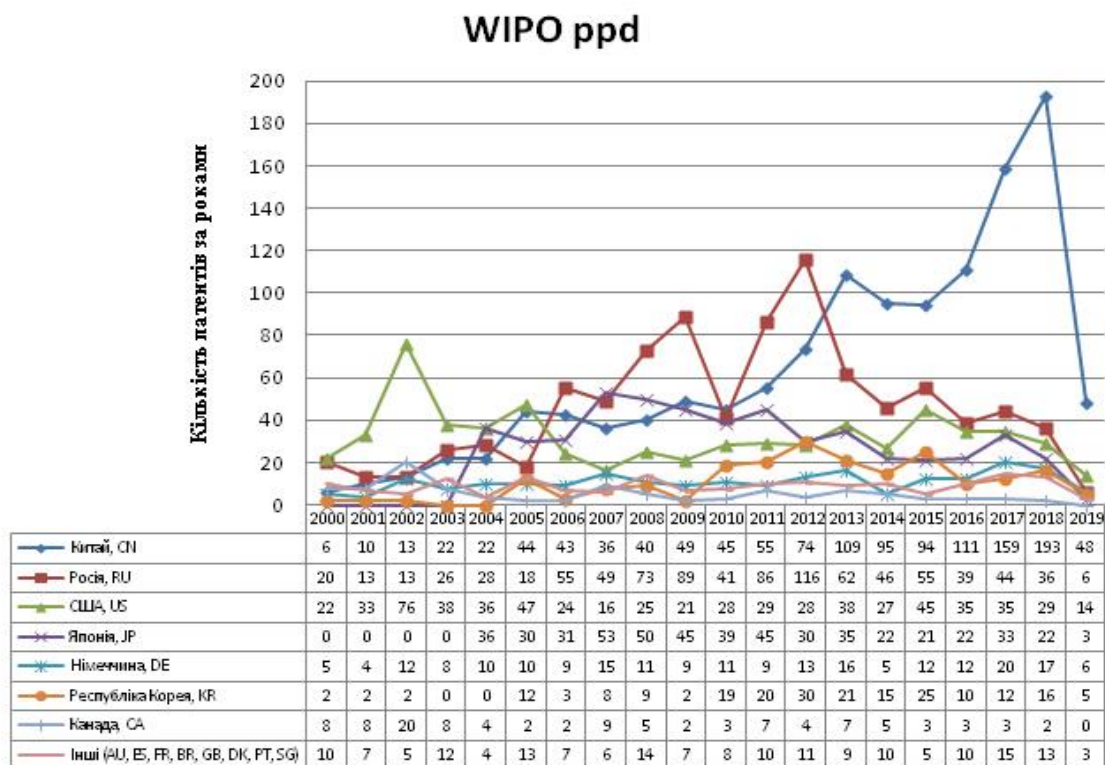


Рис. 1.4. Дані Всесвітньої організації інтелектуальної власності

Дані USPTO. Зміцнення ППД

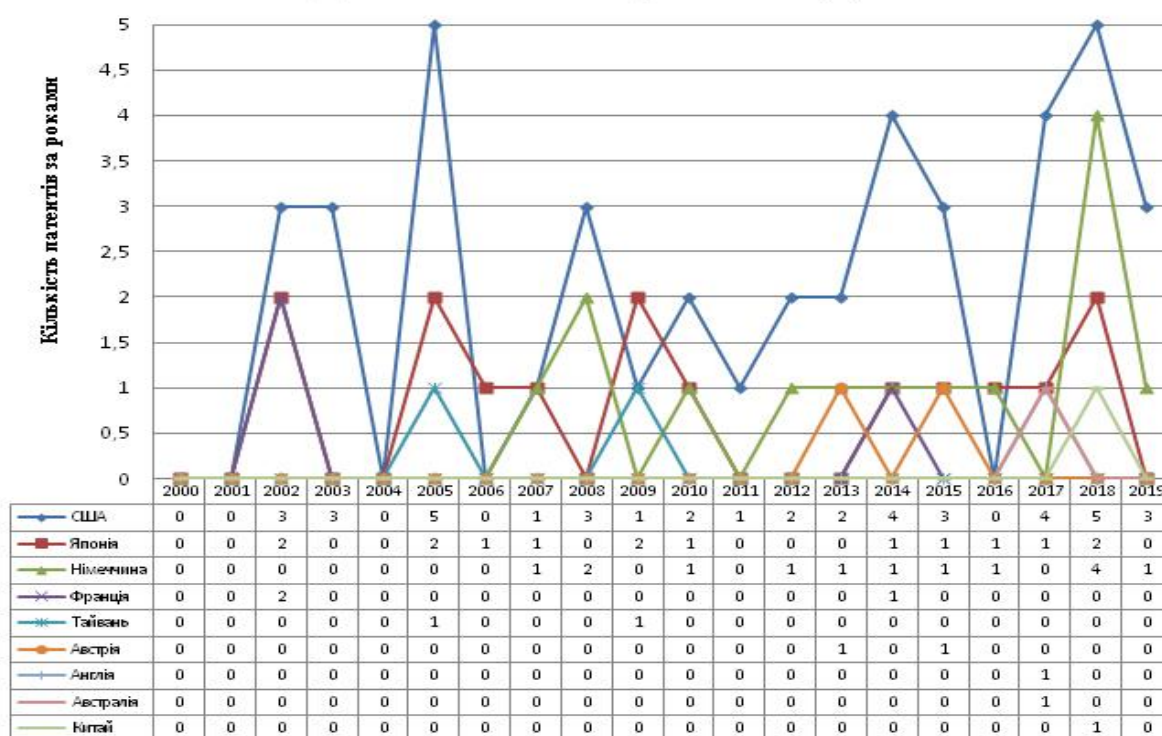


Рис. 1.5. Дані United States Patent and Trademark Office

Дані ЕРО. Зміцнення ППД

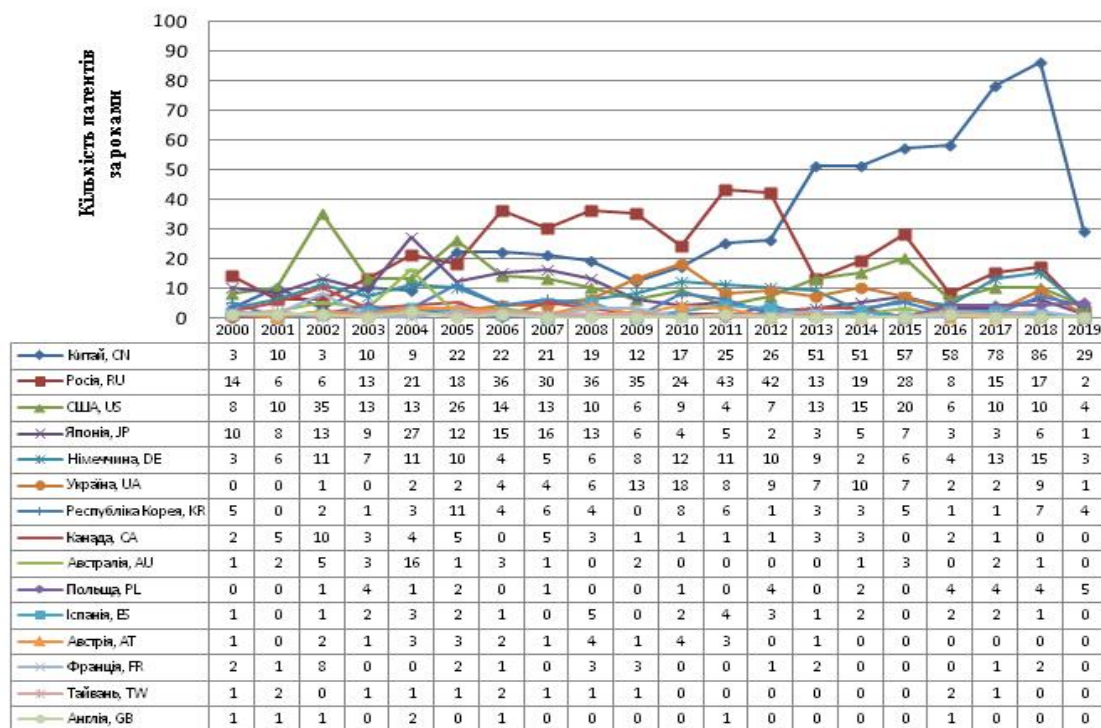


Рис. 1.6. Дані Європейського патентного відомства

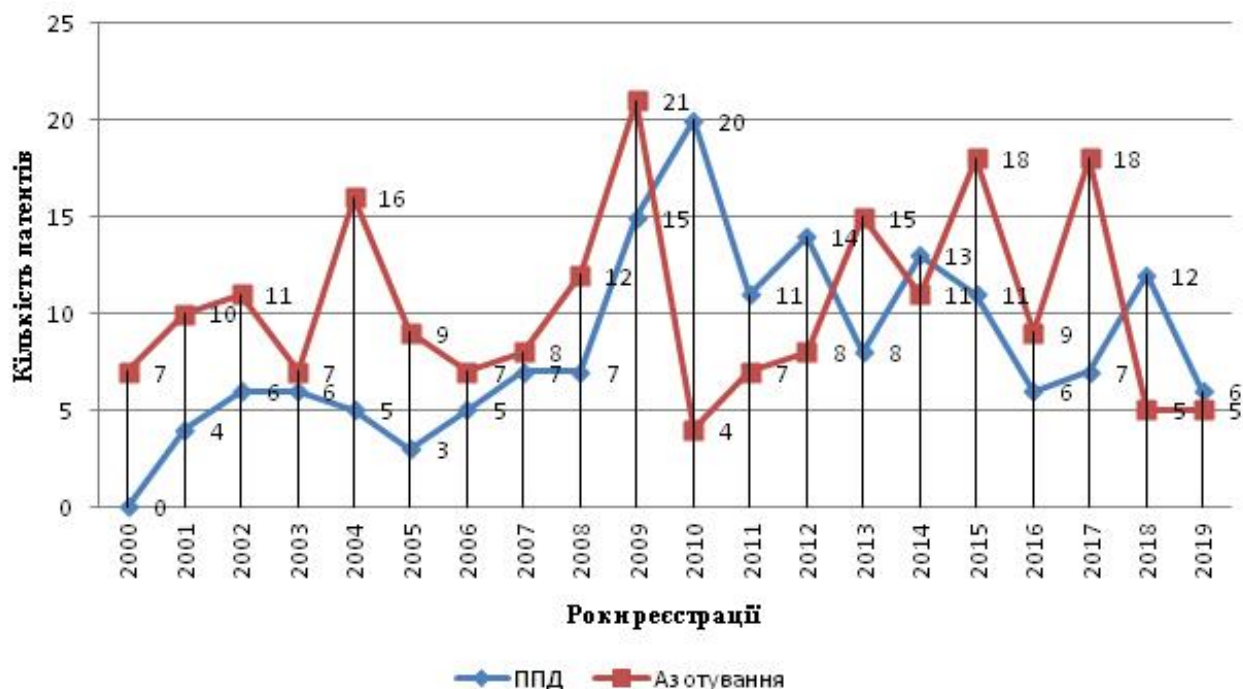


Рис. 1.7. Дані Державного підприємства «Український інститут промислової власності» (Укрпатент). Кількість реєстрацій патентів по роках за напрямками досліджень «зміцнення ППД» та «іонне азотування»

На діаграмах відображена інформація по кожному з джерел: кількість патентів, зареєстрованих по роках у заданих межах для досліджень у напрямі зміцнення поверхневим пластичним деформуванням за останні 20 років, що обумовило подальший вибір способів обробки поверхні та етапність їх застосування.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз поліграфічної продукції, що була створена на лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами і визначено ключові фактори, які впливають на кінцеві якісні характеристики готових виробів. Окрім властивостей вихідного матеріалу, клеїв тощо, значну роль у створенні якісної продукції відіграє координувально-транспортувальний блок лінії, зокрема його рухомі частини – сталеві пари тертя вал–ролик. Ці пари тертя забезпечують точність подачі вихідних

заготовок до фальцювально-склеювального блоку та відповідно точність згинів й обробки клеєм потрібних зон, що має прямий вплив на якісні показники кінцевого продукту.

2. Проведений патентний пошук та огляд літературних джерел допоміг проаналізувати сучасні методи оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь деталей, визначити переваги, недоліки та можливості їх оптимального застосування відповідно до специфіки роботи того чи іншого обладнання. Результати патентного пошуку за 2000–2019 рр. роки засвідчили значну динаміку розвитку технологій та обладнання для зміцнення металевих поверхонь пластичним деформуванням і модифікації приповерхневих шарів металу шляхом хіміко-термічної обробки іонним азотуванням. З огляду на це, актуальним є дослідження комплексної технології поверхневого зміцнення деталей поліграфічного обладнання для виготовлення інтегральних обкладинок.

3. У координувально-транспортувальному блоці лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами дотепер не розроблено технологічного забезпечення для покращення позиціонування обкладинок під час їх переміщення до фальцювального блоку. Тому розробка технологічного забезпечення, здатного вирішити поставлену задачу з одночасним зміцненням приповерхневого шару циліндричних деталей блоку та підвищенням їх корозійної стійкості, є актуальною.

4. На основі проведеного аналізу методів зміцнення з урахуванням специфіки роботи деталей координувально-транспортувального блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами та умов їх експлуатації здійснено вибір етапів комплексної технології зміцнення.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Експериментальне обладнання та методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження технологічного процесу формування мікрорельєфу на циліндричній поверхні деталі (валу) шляхом вібраційного накатування та подальшого утворення поздовжніх заглибин алмазним вигладжуванням, які передбачені першими двома етапами зміцнювальної обробки здійснювали за допомогою оздоблювально-зміцнювальної установки ОЗУ 17.00.03, яка кріпиться в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата 16K20.

Токарно-гвинторізний верстат 16K20 є пристроєм нормального класу точності, що призначений для механічної обробки деталей з чавуну, кольорових металів і різних марок сталі. На верстаті виконуються токарні, різьбонарізні роботи [59].

Основними рухами верстата моделі 16K20 є такі:

Головний рух – обертання шпинделя із закріпленою заготовкою приводить в дію через коробку швидкостей та клинопасову передачу основний електродвигун.

Поздовжня подача – за рахунок відбору потужності від шпинделя відбувається переміщення поздовжнього супорта від ходового вала по напрямних станини.

Поперечна подача – по напрямних на поздовжньому супорті здійснюється переміщення поперечного супорта.

Допоміжні рухи – швидкі переміщення супортів здійснюються через клинопасову передачу від допоміжного електродвигуна.

Основні параметри верстата відповідають вимогам ГОСТу 18097-93 «Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности».

Токарно-гвинторізний верстат 16к20 має такі основні технічні характеристики: клас точності Н (за ГОСТ 8-82); найбільший діаметр заготовки, що обробляється над станиною – 400 мм, та над супортом і вирізом в станині, відповідно, 220 мм та 630 мм; максимально можливий діаметр прутка, який обробляється та проходить через отвір шпинделя становить 52 мм; частоти обертання шпинделя знаходяться в межах 12,5...1600 об/хв. (усього кількість частот – 22); подачі, загальна кількість яких 23, знаходяться в межах 0,05...2,8 мм/об – для поздовжніх, 0,025...1,4 – для поперечних, 0,015...0,8 – для верхньої каретки; найбільша маса встановлюваної заготовки в патронах – 100 кг і центрах – 400 кг, з урахуванням маси закріплювальних елементів; при потужності двигуна приводу головного руху 10 кВт, значення максимального крутного моменту може досягати 2 кНм; габаритні розміри верстата ДхШхВ (мм) становлять 2795х1190х1500 мм при його масі, яка не перевищує 3010 кг.

Пристрій для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь є основним елементом оздоблювально-зміцнювальної установки ОЗУ 17.00.03. Він призначений для утворення на поверхнях циліндричних деталей регулярного мікрорельєфу різних класів, видів і типів відповідно до ГОСТ 24773-81 «Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики». Загальний вигляд пристрою наведено на рис. 2.1.

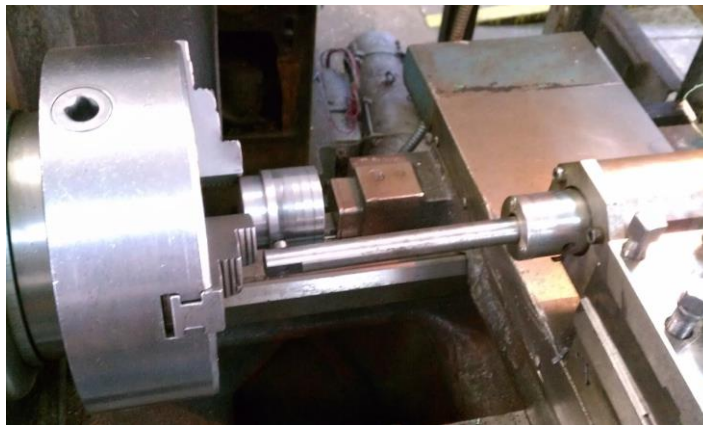


Рис. 2.1. Загальний вигляд пристрою для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь, встановленого в різцетримачі верстата 16K20

Принцип роботи пристрою (рис. 2.2):

Обертальний рух ротора автономного електродвигуна 8 за допомогою змінного ексцентрика 7 переходить у зворотно-поступальний рух тяги 2. На змінному ексцентрику 7 встановлено підшипник 6, який забезпечує рух тяги. Тяга рухається в корпусі 5, який зібраний з декількох частин. У корпусі розміщено державку 3, до якої за допомогою тяги передається зворотно-поступальний рух. Величина зусилля вдавлювання передається через тягу 2, на якій закріплено алмазний вигладжувач 1, робоча частина якого – алмазний композит АКТМ [60].

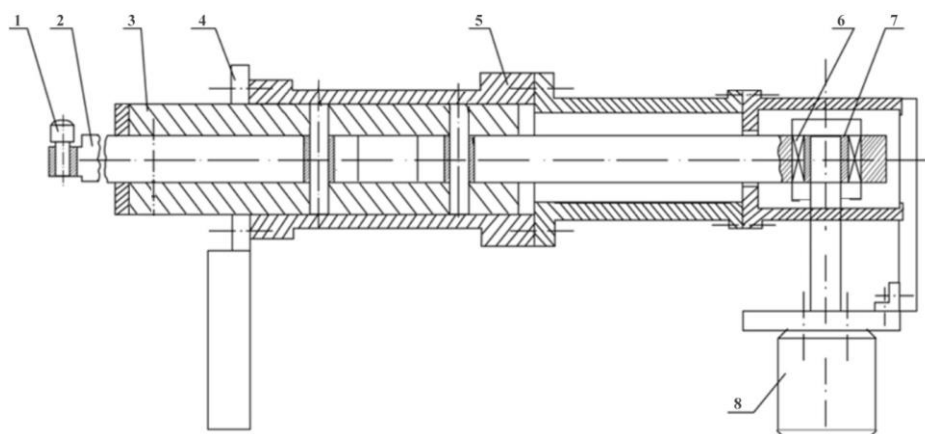


Рис. 2.2. Принципова схема пристрою для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь: 1 – алмазний вигладжувач, 2 – тяга, 3 – державка, 4 – планка, 5 – корпус, 6 – підшипник, 7 – змінний ексцентрик, 8 – електродвигун з ротором

Алмазні вигладжувачі володіють такими характеристиками: високі твердість, зносостійкість, теплопровідність, модуль пружності; низький коефіцієнт тертя робочої поверхні по металу та невелика її шорсткість. У наших експериментальних дослідженнях використовувались алмазні вигладжувачі (рис. 2.3), робочі поверхні яких виготовлені з алмазного композитного термостабільного матеріалу (АКТМ) та мають сферичну форму з радіусом заокруглення від 0,5 до 4 мм. Такий тип вигладжувача [61] має кращі властивості, ніж його аналоги, такі як АСБ та АСПК, а тому й продуктивність обробки цим вигладжувачем відповідно є вищою. Фізико-механічні властивості алмазного композитного термостійкого матеріалу наведено в табл. 2.1.



Рис. 2.3. Алмазний вигладжувач з робочою поверхнею сферичної форми

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості
полікристалічного алмазного композиту типу АКТМ

Параметр	Значення
Густина, г/см	33,43 – 3,45
Твердість за Кнупом, ГПа	50 – 55
Тріщиностійкість, МПа·м ^{1/2}	10 – 12
Міцність на стиснення, ГПа	2,2 – 3,1
Модуль Юнга, ГПа	970
Теплопровідність, Вт / (м·К)	250 – 300
Зносостійкість при правці корундового круга, мг/кг	4,4
Термостабільність, К	1500

Будова алмазного вигладжувача є типовою для цього сегменту алмазних інструментів: робоча поверхня з АКТМ сферичної форми припаяна до тримача з конструкційної сталі, виконаного по типу 2 з діаметром головки, який більший від діаметра основної частини, що забезпечує надійну фіксацію вигладжувача в пристрої для вібраційного обкатування [62].

Типорозміри алмазних вигладжувачів, які використовувались в пристрої для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь у ході наших досліджень, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Типорозміри алмазних вигладжувачів з робочою поверхнею
із АКТМ сферичної форми

D, мм	d, мм	L, мм	R, мм	Маса алмазного композиту, карат
12	8	32	0,5	0,21 – 0,30
			1,0	
			1,5	
			2,0	
			2,5	0,31 – 0,40
			3,0	
			3,5	0,41 – 0,60
			4,0	

Оптимальні режими вібраційного обкатування на першому етапі обробки та алмазного вигладжування на другому етапі визначались експериментально (наведені в розділі 5).

Експериментальні дослідження технологічного процесу формування дифузійних шарів методом іонно-плазмового азотування, яке застосовувалось на третьому заключному етапі комплексної зміцнювальної обробки, здійснювали на створений в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України спеціалізованій технологічній установці для формування вуглецевих нанотрубок в єдиному технологічному циклі, яка була переналаштована для процесу азотування [51]. Загальний вигляд установки подано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Загальний вигляд установки для іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок в єдиному вакуумно-технологічному циклі

Установка містить геліконне джерело плазми з робочою частотою 13,56 МГц і плазмово-дугові прискорювачі, об'єднані в одній вакуумній камері. Її експериментальний зразок розроблено та виготовлено 2008 р. у рамках інноваційного проекту № 23 НАН України.

Геліконне джерело плазми призначене для попереднього іонно-плазмового очищення поверхні підкладок та нанесення перехідних і каталітичних шарів. Плазмово-дугові прискорювачі використовуються для нанесення перехідних адгезивних шарів, шарів металу-каталізатора та для направлення на підкладку додаткового потоку іонів з регульованою енергією та густиною (у проведених нами дослідженнях прискорювачі не задіяні).

Окрім основного призначення установку можна використовувати для нанесення одно- та багатокомпонентних плівок металів незалежно від

температури плавлення та величини електропровідності як на металеві, так і на діелектричні підкладки; для формування багатокомпонентних окисних і нітридних плівок [63].

Розрядна плазмова камера установки (рис. 2.5) складається з трьох технологічних відсіків, а саме:

- розрядної камери геліконного джерела;
- дрейфової камери;
- камери обробки.

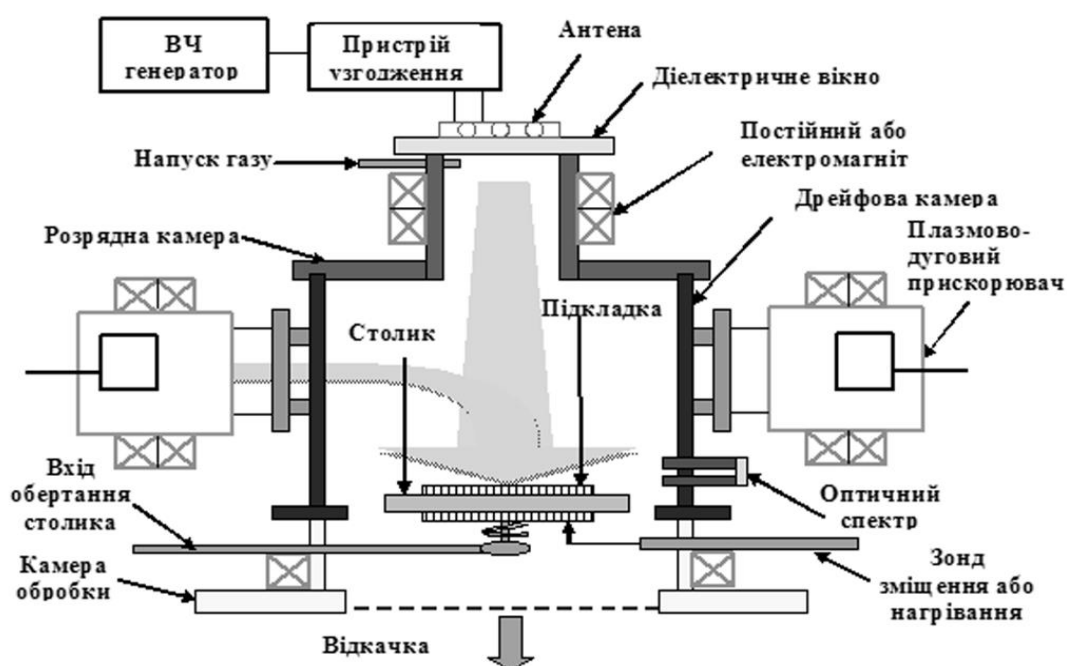


Рис. 2.5. Схематичне зображення розрядної плазмової камери

Усі три камери з'єднані між собою фланцями через вакуумні ущільнення. Камера обробки, в якій розташований столик з підкладкою, приєднується безпосередньо до фланця вакуумної системи. Над камерою обробки розташована дрейфова камера з пристикованими вакуумно-дуговими прискорювачами. Дрейфова камера з'єднана з розрядною камерою геліконного джерела. Зверху вона закрита склом із кварцу, через нього, за допомогою антени, в розряд вводиться високочастотна енергія. Сама ж антена через узгоджувальний пристрій приєднана до ВЧ-генератора.

Магнітна система геліконного джерела плазми призначена створювати умови для збудження в плазмі розряду власних плазмових електромагнітних хвиль (геліконних мод). При цьому ефективно поглинається зовнішня ВЧ-енергія в плазмі та генерується плазма з високою густиною заряджених частинок.

Магнітна котушка, розташована в зоні камери обробки (на рис. 2.5 не показана), забезпечує супровід плазмового потоку з геліконного джерела до підкладки, а також використовується для повороту потоку плазми з плазово-дугового прискорювача в напрямку підкладки.

Зазначена конфігурація розрядної плазової камери, яка функціонально поєднує в собі два джерела плазми – геліконний розряд і плазово-дуговий прискорювач, дозволяє реалізувати нову якість технологічного процесу. Паралельна робота геліконного джерела плазми та плазово-дугового прискорювача забезпечує на всіх стадіях технологічного процесу постійну дію на підкладку іонного потоку. При цьому густина й енергія іонного потоку мають величину, достатню для ефективного видалення з поверхонь підкладок адсорбованих легких компонентів залишкового середовища за рахунок механізму селективного розпилення, і це не заважає основним операціям технологічного процесу [63].

Дослідження режимів плазових розрядів дозволило вибрати оптимальні умови технологічного процесу. Контроль технологічних процесів в установці здійснювали за допомогою пристикованих до неї малогабаритного оптичного спектрометра та електричного зонда з виводом інформації на монітор комп'ютера.

Для відкачування до граничного залишкового тиску розрядної плазової камери, підтримування потрібного тиску робочих газів у технологічному процесі, забезпечення необхідних потоків робочих газів у камері геліконного джерела й у дрейфовій камері використовувалась вакуумна система (рис. 2.6).

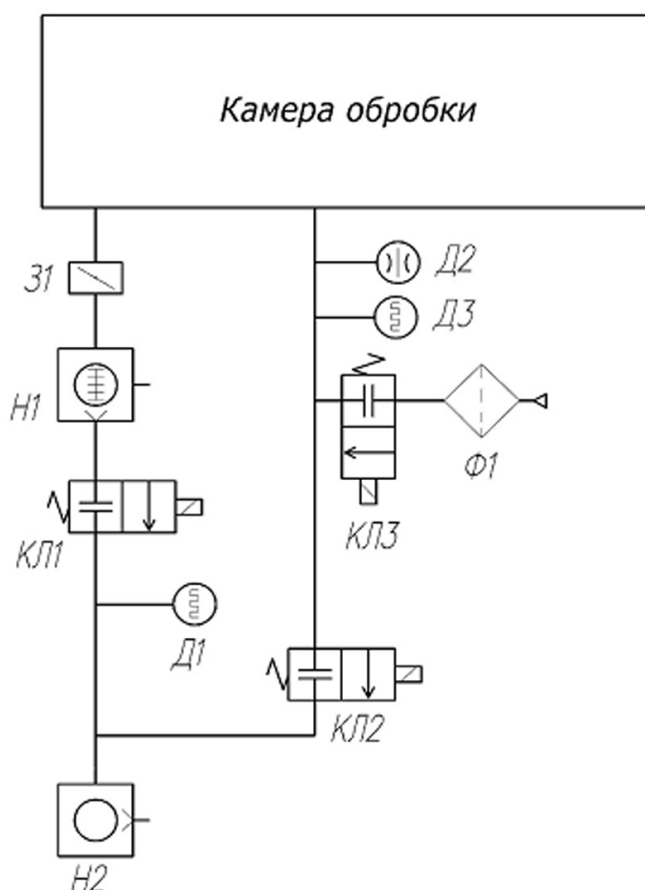


Рис. 2.6. Принципова схема вакуумної системи установки
(розшифровку позначень наведено в тексті)

Вакуумна система включає агрегат на основі дифузійного насоса Н1, що приєднаний через високовакуумний затвор З1 до камери обробки з розміщеним у ній столиком з підкладкою, на якій має формуватись відповідна структура. На вході дифузійний насос Н1 приєднаний до механічного форвакуумного насоса Н2 через вакуумний клапан КЛ1. Тиск у дифузійному насосі при відкачуванні форвакуумним насосом вимірюється термопарним датчиком Д1 [63].

Попереднє розрядження в камері обробки здійснюється через лінію байпасного відкачування механічним насосом Н2, з'єднаним з камерою обробки через вакуумний клапан КЛ2. Камера обробки є складовою частиною розрядної плазмової камери установки. Залишковий тиск та тиск робочого газу при його значенні менше 10 мТорр вимірюється іонізаційним датчиком Д2, а робочий тиск при значеннях вище 10 мТорр – термопарним

датчиком ДЗ. Напуск атмосферного повітря в реакційну камеру для подальшої її розгерметизації здійснюється через фільтр Ф1 і клапан КЛЗ при закритих клапані КЛ2 і високовакуумному затворі З1.

2.2. Вибір матеріалів для зразків

Правильний вибір матеріалів для зразків залежить від певних чинників, зокрема таких, як: умови експлуатації вузла тертя, вимоги до довговічності, міцності й надійності окремих його деталей, економічна виправданість застосування тощо.

Аналіз літературних джерел [60; 64; 65] показав, що здебільшого циліндричні деталі поліграфічного обладнання форм тіл обертання, які утворюють пари тертя та підлягають інтенсивному зношуванню в процесі експлуатації, виготовлені з конструкційних вуглецевих та легированих сталей. Це є виправданим за рахунок співвідношення вартості прокату таких сталей до їх фізико-механічних властивостей та здатності до покращення цих властивостей шляхом певних видів обробки. З огляду на це здійснювався вибір матеріалів для виготовлення зразків, які в подальшому досліджувались.

Структура циліндричних деталей, які утворюють пари тертя в транспортувально-координуючому блоці, як показали дослідження, відповідає сталі 45 ДСТУ 7809:2015 «Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови». Тому для проведення досліджень нами використовувались експериментальні зразки здебільшого з вуглецевої якісної конструкційної сталі 45, що відповідає вищезазначеному стандарту та з конструкційної легированої (хромистої) сталі 20Х, яка відповідає ДСТУ 7806:2015 «Прокат із легированої конструкційної сталі. Технічні умови». Хімічний склад матеріалів наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Хімічний склад матеріалів сталь 45 та 20Х (основних елементів)
згідно ДСТУ 7809:2015 та ДСТУ 7806:2015 відповідно

Матеріал	Масова частка хімічних елементів, %			
	Вуглецю (C)	Кремнію (Si)	Марганцю (Mn)	Хрому (Cr), не більше ніж
Сталь 45	0,42 – 0,50	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	0,25
Сталь 20Х	0,17 – 0,23	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	0,7 – 1

Багато в чому експлуатаційні та інші якості визначаються хімічним складом. Це пов'язано з тим, що деякі елементи здатні істотно підвищити міцність, інші збільшують крихкість. Хімічний склад сталі 45 характеризується присутністю основних хімічних елементів: заліза і вуглецю. Від концентрації другого елементу багато в чому залежить те, наскільки міцним і твердим виходить виріб. Встановлені стандарти визначають те, що концентрація вуглецю повинна становити від 0,42 до 0,5%. При цьому в складі металу близько 97%. До складу включається відносно невелика кількість легуючих елементів. Основними можна назвати магній і кремній. Їх показник концентрації становить понад 0,1%. Концентрація інших елементів витримується в певному діапазоні. Наприклад, ДСТУ визначає невелику кількість сірки і фосфору, так як ці елементи призводять до погіршення експлуатаційних якостей.

Призначення матеріалу сталь 45: вал-шестерні, колінчаті і розподільчі вали, шестерні, шпинделі, бандажі, циліндри, кулачки і інші нормалізовані та деталі, що піддаються покращенню і поверхневій термообробці, від яких потрібна підвищена міцність.

Дослідження на кожному з етапів комплексної зміцнювальної обробки проводили на зразках із матеріалів сталь 45 та 20Х у стані поставки, що не

піддавалась попередній термічній обробці. Для перших двох етапів обробки пластичним деформуванням використовувались заготовки, виточені по розмірах оригінальних деталей (валів та роликів координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами). Дослідження третього етапу – азотування проводились спершу на заготовках зі сталі 45, що мали розміри 10x20x3 мм, а після визначення оптимальних параметрів обробки – на заготовках, що пройшли перші два етапи формування мікрорельєфу.

2.3. Вимірювальне обладнання та методика проведення досліджень

Проведення досліджень параметрів поверхні зразків здійснювалось за такими показниками, як шорсткість, твердість, зносостійкість, наявність залишкових напружень основного матеріалу й поверхневого шару шляхом вимірювання вихідного стану досліджуваного матеріалу та його станів після певних етапів комплексної зміцнювальної обробки.

2.3.1. Дослідження мікроструктури

Для дослідження структури металу деталей в початковому стані та визначення змін у його приповерхневих шарах після обробки ППД та іонно-плазмового азотування було проведено металографічний аналіз. Дослідження методами оптичної металографії [66; 67] з використанням фотомікроскопа віддзеркаленого світла Neophot-32 дають можливість досліджувати травлені та нетравлені мікрошліфи з матеріалів при збільшеннях до $\times 1000$ та фотографувати їх.

Мікрошліфи виготовляли методом механічного полірування з грубим та дрібним абразивом використовуючи шліфувальні порошки (M20, M14), потім шліфи піддавали хімічній обробці. Для травлення полірованої поверхні використовували 5 %-й розчин азотної кислоти в 96 %-му етанолі.

Металографічний аналіз застосовувався як до зразків, що перебували у початковому стані, так і до зразків, які пройшли обробку поверхневим пластичним деформуванням та комплексну технологію зміцнення.

2.3.2. Дослідження шорсткості

Визначення параметрів шорсткості (мікрогеометрії) циліндричної поверхні деталей проводили механічним контактним методом за допомогою щупового приладу, що являє собою модуль (рис. 2.7) з модернізованим мотоприводом, зібраний на основі профілометра моделі 296, в поєднанні з ЕОМ IBM PC з мікропроцесором 60485. Зовнішній вигляд профілометра наведено на рис. 2.8.

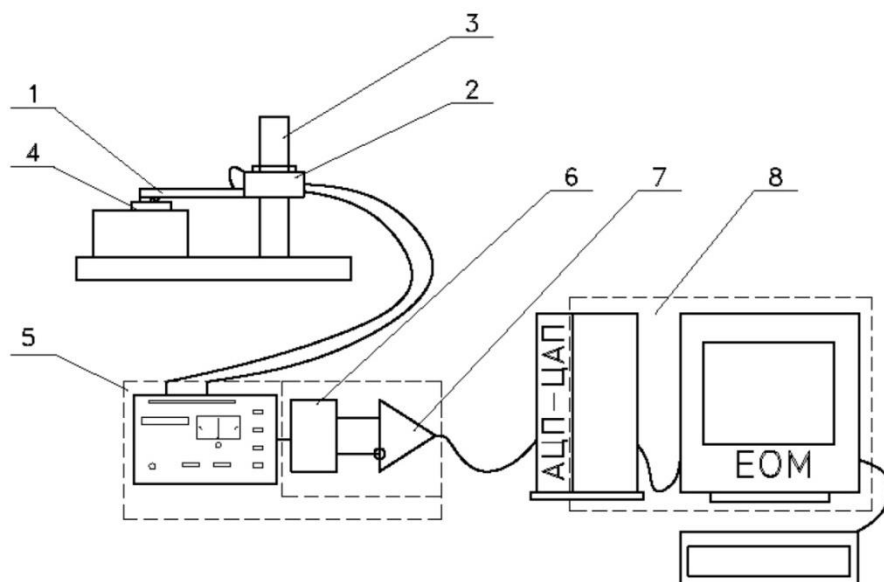


Рис. 2.7. Блок-схема модуля для вимірювання фасонних профілів

Вимірювальний модуль для фасонних профілів призначений для вимірювання шорсткості поверхонь в діапазоні $R_a = 0,02\text{--}10$ мкм з довжиною траси вимірювання 1,5–6 мм. Дія модуля профілометра заснована на принципі поетапного ошупування поверхні досліджуваного зразка алмазною голкою щупа з малим радіусом заокруглення і перетворення механічних коливань щупа в змінний електричний сигнал, який пропорційний до цих коливань.

Лінійні коливання голки, що відповідають профілю поверхні зразка, перетворюються в електричні сигнали в датчику 1. Переміщення датчика 1 поверхнею 4, що вимірюється на шорсткість, здійснюється електроприводом 2, який кріпиться на стійці 3. Блок спряження 5 складається з фільтра типу RC 6 (для низьких частот) і підсилювача сигналів 7. Фільтр призначено для виділення сигналу в діапазоні 0... 250 Гц. Електричний сигнал з блока спряження подається в блок 8 (аналого-цифровий перетворювач АЦП), а звітти направляється до електронно-обчислювальної машини. Модуль для вимірювання профілів дає змогу записувати та обробляти сигнал і порівнювати отриманий профіль досліджуваної поверхні з існуючою моделлю або з іншими результатами, отриманими від аналогічних засобів вимірювання. Характеристики досліджуваної поверхні отримують з допомогою спеціальних методів і прикладних програм. Модуль дає змогу вимірювати профілі довжиною до 40 мм і висотою до 1 мм з точністю 0,001 мм з використанням алмазної голки з радіусом округлення 0,01 мм і застосуванням додаткового математичного апарата [68, 69]. В електронній схемі блока спряження можна змінювати діапазон вимірювання профілю по висоті від 10 мкм до 1 мм [70].



Рис. 2.8. Загальний вигляд профілометра моделі 296

Дослідження виконувались з використанням модуля приладу з модернізованим мотоприводом, для розширення функціональних можливостей якого в мотоприводі було змонтовано датчик лінійних переміщень, а на корпусі мотопривода – виносну опору для розширення діапазону вимірювання [70].

На рис. 2.9 подано схематичну методику вимірювання та обробки результатів, результати вимірювання параметрів фасонних поверхонь, на прикладі протяжки.

Вимірювання фасонного профілю проводиться в декілька етапів. Передусім проводиться тарування величини вертикальних і горизонтальних переміщень алмазної голки (визначаються масштабні коефіцієнти по осях). Вертикальні переміщення таруються на всьому вимірюваному діапазоні по набору плоскопаралельних кінцевих мір довжини. Тарування горизонтальних переміщень проводиться за допомогою повіреної лінійки на всій вимірюваній довжині переміщення датчика, а для більш точного тарування використовується еталонна міра шорсткості з регулярним мікропрофілем [70].

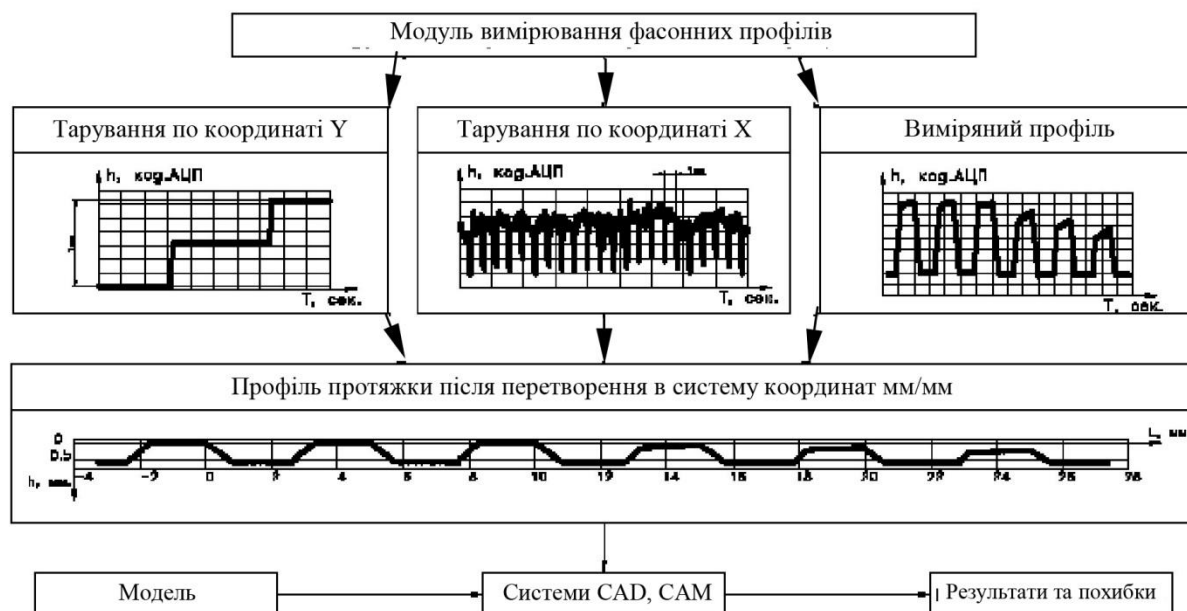


Рис. 2.9. Схематична методика вимірювання та обробки результатів [70]

Результати вимірювання профілю приводяться до метричної системи координат деталі за допомогою масштабних коефіцієнтів. Обробляти результати вимірювання можна в різних системах, зокрема, AutoCad, MathCad, MatLab, Ms Excel, Компас та інші. Основою для розрахунків слугує модель вимірюваної деталі. Під час обробки результатів вимірюваний профіль розбивають на елементарні прямолінійні та криволінійні поверхні та визначають точки прив'язки до системи координат деталі. За допомогою спеціально розробленого математичного апарата визначаються похибки відносно моделі [70].

2.3.3. Дослідження твердості

Під твердістю розуміють здатність матеріалу чинити опір пружній деформації, пластичній деформації або руйнуванню в поверхневому шарі [71]. Вимірювання твердості є одним з найпоширеніших видів механічних випробувань металів.

Для визначення твердості використовували метод Віккерса (HV), який полягає у вдавлюванні в досліджуваний металевий зразок алмазної піраміди з кутом при вершині між протилежними гранями 136° . Зусилля вдавнення вибирається залежно від товщини та твердості зразка і складає від 1 до 100 кгс. Значення твердості отримується діленням прикладеного до індентора навантаження на площу пірамідального відбитка, яку визначають по діагоналі відбитка. Метод досить універсальний, дозволяє вимірювати твердість практично будь-якого металу та сплаву [72].

Під час дослідження твердості було виготовлено стандартні зразки для проведення випробувань на твердість згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007 «Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування».

Зразки, виготовлені зі сталі 45, піддавали шліфуванню. Відшліфовані зразки фіксували в оправці. Потім підготовлений мікрошліф піддавали травленню 10% розчином HNO_3 (азотна кислота). Вихідну мікротвердість зразків для експериментальних досліджень визначали на мікротвердомірі ПМТ-3М з навантаженням 20 і 50 г протягом 15 с. Точність вимірювання окуляр-мікрометра АМ9-3 на мікротвердомірі може становити $\pm 0,5$ поділки

шкали барабана або, з урахуванням масштабу збільшення, вона дорівнює 0,15 мкм. Найбільша основна похибка окуляр-мікрометра на всьому діапазоні вимірювань не перевищує ± 2 мкм згідно з паспортом приладу.

При вимірюванні мікротвердості методом відновленого відбитка [73] з використанням індентора – чотиригранної алмазної піраміди з квадратною основою з кутом при вершині 136° – для розрахунку твердості застосовують формулу [74]:

$$H_{\mu} = H_{\kappa\epsilon} = \frac{P}{S} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (2.1)$$

де P – навантаження на індентор;

d – середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм.

Величина діагоналі відбитка визначається за формулою

$$d = Mc, \quad (2.2)$$

де M – кількість поділок на шкалі барабана мікрометра;

c – ціна маленької поділки вимірювального барабана окулярного мікрометра, яка дорівнює 0,3 мкм у приладі ПМТ-3М.

Щоб не обчислювати твердість за наведеною вище формулою (2.1), ДСТУ ISO 6507-4:2008 «Металеві матеріали. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 4. Таблиці значень твердості» передбачені спеціальні таблиці (табл. 2.6–2.7), розраховані на навантаження 20 г та 50 г відповідно.

Випробовування виконували на декількох ідентично оброблених зразках і розраховували середнє значення вимірювань. Для визначення мікротвердості виміри проводилися в декількох точках, розташованих на різній відстані від краю зразка (25, 50, 75, 100, 150, ... 225 мкм). Значення мікротвердості обчислювали за середнім арифметичним значенням результатів виміру діагоналі відбитків [74].

Нижче наведено стандартизовані значення чисел твердості залежно від розмірів діагоналі відбитка та прикладеного навантаження (табл. 2.4–2.5).

Таблиця 2.4

Числа твердості кгс/мм² при випробуванні на мікротвердість
вдавленням алмазної піраміди. Навантаження 20 г

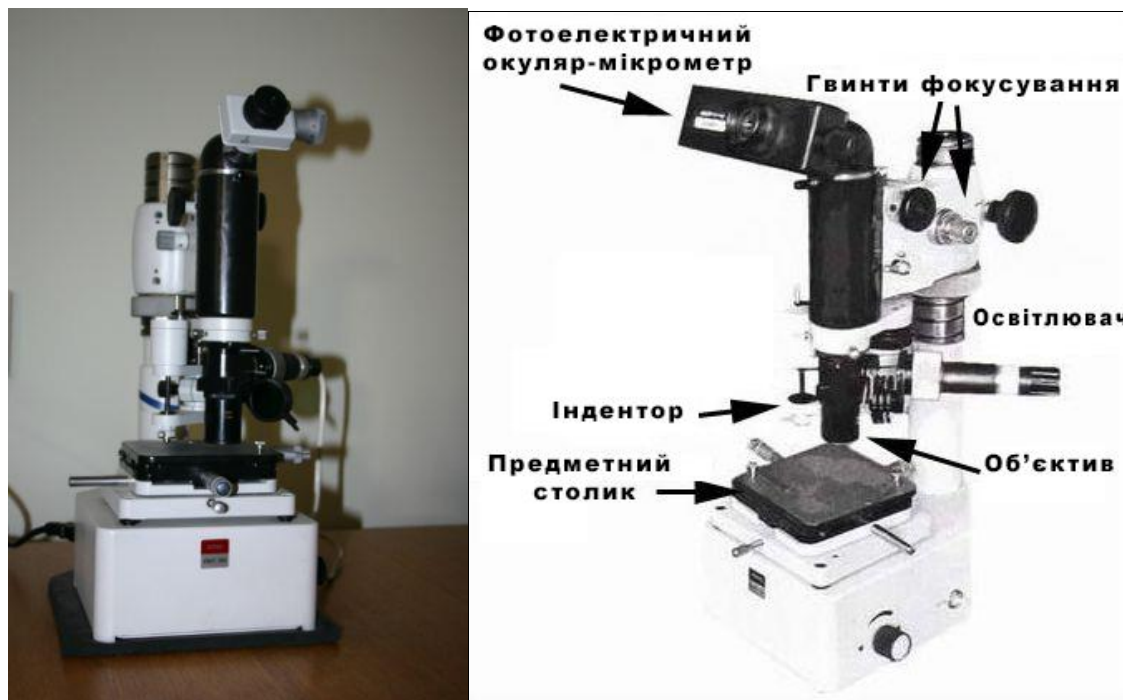
Діагональ відбитка μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	—	—	—	231	148	103	757	580	458
10	371	307	258	219	189	165	145	128	114	103
20	92	84	76	70	64,4	59,4	54,9	50	47	44
30	41	38	36	34	32,1	30,3	28,6	27	25	24
40	23	22	21	20	19,2	18,3	17,5	16	16	15
50	14	14	13	13	12,7	12,3	11,8	11	11	10
60	10	10	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблиця 2.5

Числа твердості кгс/мм² при випробуванні на мікротвердість
вдавленням алмазної піраміди. Навантаження 50 г

Діагональ відбитка μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	—	—	—	—	371	257	189	144	134
10	927	766	644	549	473	412	362	321	286	257
20	232	210	192	175	161	148	137	127	118	110
30	103	96	90	85	80	75,7	71,6	67,7	64,2	61
40	58	55	52	50	50,7	45,8	43,8	42	40,3	38,6
50	37	35	34	33	31	30,6	29,6	28,5	27,6	26,6
60	25	24	24	23	22	22	21,3	20,6	20,1	19,5
70	18	18	17	17	16	16,5	16,1	15,6	15,2	14,9
80	14	14	13	13	13	12,8	12,5	12,2	12	11,7
90	11	11	11	10	10	10,3	10,1	—	—	—

Зовнішній вигляд мікротвердоміра ПМТ-3М (рис. 2.10 (а, б) та його характеристики наведені нижче [75].



(а)

(б)

Рис. 2.10. Мікротвердомір ПМТ-3М: а) зовнішній вигляд; б) будова

До основних технічних характеристик мікротвердоміра ПМТ-3М слід віднести його габаритні розміри та масу, що становлять не більше 270x290x470 мм та 22 кг відповідно, діапазон навантаження – від 0,0196 Н до 4,9 Н (від 0,002 кгс до 0,500 кгс); значення величини збільшення мікроскопа мікротвердоміра, які можуть становити x130, x500 або x800; ціну поділки шкал барабанів мікрометричних гвинтів координатного переміщення, що становить 0,01 мм; межі координатного переміщення предметного столика у двох взаємно перпендикулярних напрямках (можуть мати значення 0 і 10 мм).

2.3.4. Дослідження зносостійкості

Вихід з ладу валів і притискних роликів вузла координувально-транспортного механізму (рис. 2.11) лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами зумовлений руйнуванням їх

поверхневого шару. З огляду на специфіку роботи цього вузла, його циліндричні рухомі деталі (1) та (2), що контактують з палітурним матеріалом, найбільш схильні до механічного зношування, оскільки вони переміщують обертальними рухами на великій швидкості заготовки обкладинок з одночасним припресуванням їх крайків (сфальцьованих та з нанесеним клеєвим шаром) [66]. Першими показниками зношення рухомих сталевих деталей транспортувального механізму є проковзування вихідного матеріалу, зниження точності подачі, перекося та інші наслідки від яких напряду залежить контурна стабільність готових обкладинок.

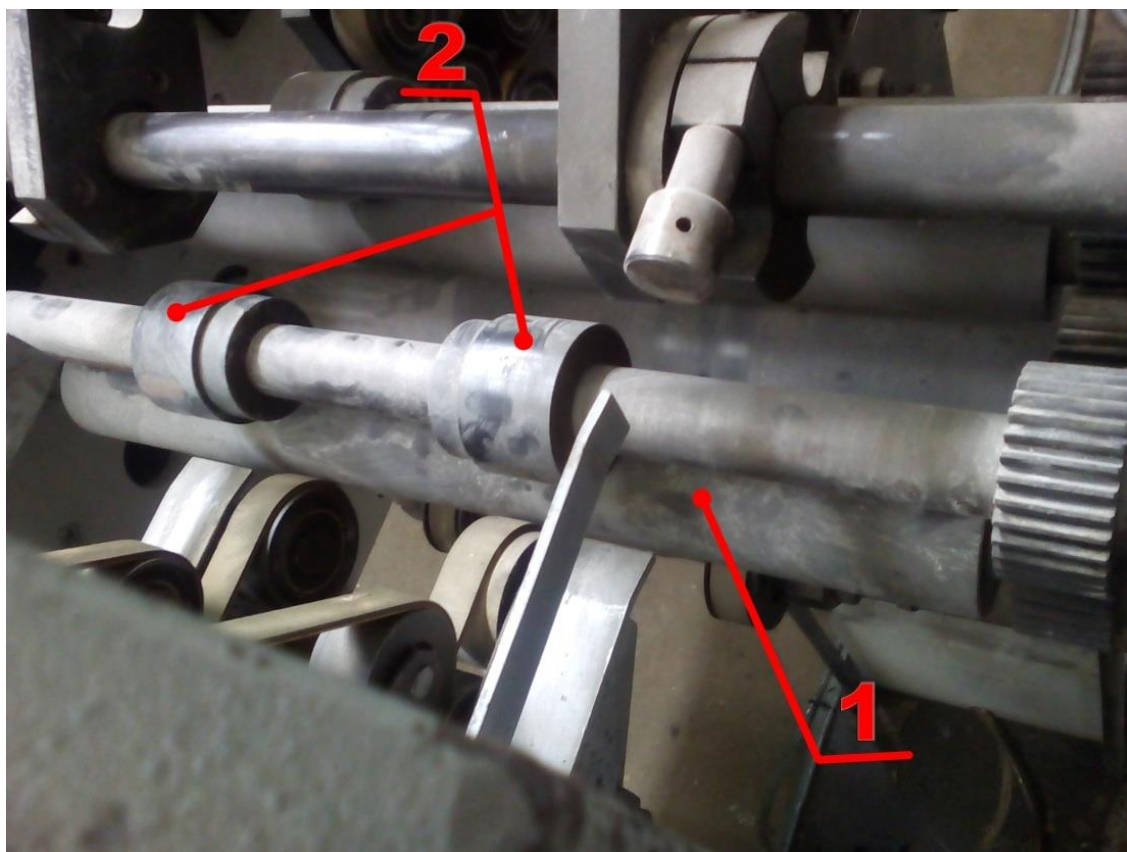


Рис. 2.11. Циліндричні пари тертя транспортувального механізму:

1 – привідний опорний вал, 2 – притискні ролики

Отже, виходячи з вищеперерахованих факторів, під час дослідження зносостійкості використовувалась пара тертя ролик – ролик, тобто в координувально-транспортувальному механізмі нижній (опорний) вал

більшого діаметру (1) був замінений на менший з можливістю фіксації на ньому притискних роликів (2) (ідентичний верхньому).

Випробовування триботехнічних властивостей проводилося спершу на зразках зі сталі 45 у початковому стані (обробка чистовим точінням), які являли собою точні копії роликів (2) (рис. 2.11) і були зафіксовані на валах, далі – на аналогічних зразках з нанесеним ПРМР та поздовжнім ЧРМР, наступні – на зразках, які пройшли всі три етапи комплексної зміцнювальної обробки (нанесення на поверхню ПРМР вібраційним накатуванням, формування ЧРМР у вигляді поздовжніх заглибін алмазним вигладжуванням та обробка іонним азотуванням в плазмі геліконного розряду).

Умови проведення дослідів були аналогічні реальним. Швидкість ковзання $V = 0,6$ м/с; схема тертя: ролик (контртіло), HRC 44...46 – ролик (зразок), HRC 44...46; тертя без змащування; шлях тертя – 45360 м (час = 21 год), величина зусилля навантаження – 5 кгс.

Для визначення зношування використовувався ваговий метод, який зазвичай застосовують для визначення зношення невеликих деталей. Їх зважують до і після випробувань, тобто відбувається визначення зносу по втраті маси. Перед зважуванням та після зважування деталі були ретельно промиті та висушені. Точність цього методу залежить від точності ваг і знаходиться в межах $(0,05...5) \cdot 10^{-6}$ г. В якості засобів вимірювання використовують різні ваги: приладові ПР-500, аналітичні ВА-200, АДВ-200М, технічні, настільні, закриті ВНЗ-3 та ін. В нашому випадку вимірювання проводились з використанням електронних лабораторних ваг Radwag PS 600.R2 (точність визначення маси яких становить 0,001 г).

Визначення величини лінійного зношення по втраті ваги здійснюється шляхом обчислень, заснованих на припущенні, що зношування відбувається рівномірно по поверхні тертя. Лінійна характеристика зношування являє собою висоту зношеного шару, що припадає на одиницю шляху тертя, Вагове зношення перераховується в лінійне за такою залежністю [76]:

$$I = \frac{Q}{S \cdot v \cdot L \cdot 10^5}, \quad (2.3)$$

де Q – вагове зношення, мг;

S – площа поверхні тертя, см^2 ;

ν – питома вага матеріалу, г/см^3 ;

L – шлях тертя, м.

Дослідження проводились на десяти комплектах зразків, вагою по 570 г, при максимальному відхиленні ваги кожного із зразків ± 10 г. Вимірювання ваги зразків при дослідженні здійснювалися кожні 45 хв (або після кожних 1620 м шляху тертя) на протязі 1260 хв (або 45,36 км).

2.3.5. Методика розрахункових досліджень залишкових напружень методом кінцевих елементів з використанням CAD / CAE ANSYS

Моделювання двохетапного процесу обробки поверхневим пластичним деформуванням виконується з використанням системи інженерного розрахунку CAD / CAE ANSYS, що реалізує метод кінцевих елементів [77; 78]. Вирішувалася контактна задача деформування абсолютно жорстким індентором пружно-пластичного фізично нелінійного тіла [79]. Розробка моделі передбачає такі етапи:

1. Вибір розрахункової схеми процесу.
2. Визначення допусків з урахуванням особливостей програмного продукту, що використовується для моделювання та розрахунку.
3. Геометрична побудова моделі процесу.
4. Задання фізико-механічних властивостей матеріалу елементів моделі.
5. Вибір кінцевого елемента і розбивка моделі.
6. Задання граничних умов.
7. Вибір контактних елементів і задання контакту між інструментом і деталлю.
8. Вибір вирішувача та вирішення тестового завдання.
9. Аналіз результатів вирішення.

Побудову розрахункової моделі наведено в розд. 4.

2.3.6. Дослідження тиражної стабільності обкладинок

Дослідження тиражної стабільності готових інтегральних обкладинок, тобто відхилення їх контурної прямокутної геометрії від допустимих розмірів (відсоток відбракування у межах накладу), здійснювалось візуальним контролем та методом вибіркового вимірювання за допомогою висіченого з пластику шаблону. Шаблон для вимірювання висікається на тому ж обладнанні, що і заготовки для обкладинок, його робочою частиною є внутрішня поверхня. Паралельність відхилення зовнішніх контурів готової обкладинки від прямокутної побудови (на 100 мм) не повинна перевищувати 0,2–0,5 мм, інакше вона відбраковується та підлягає вилученню з накладу. Візуальний контроль застосовується до всієї продукції, а вибіркове вимірювання шаблоном – до 10 % продукції з накладу.

Висновки до розділу 2

1. Обрано матеріали й умови для проведення теоретичних та експериментальних досліджень по впровадженню комплексної технології поверхневого зміцнення деталей координувально-транспортувального вузла лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами.
2. Запропоновано методику проведення досліджень по визначенню кількості відбракувань інтегральних обкладинок при різних накладах без застосування комплексного технологічного процесу ОЗО для деталей координувально-транспортувального блоку та з його застосуванням.
3. Запропоновано пристрій для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь, який забезпечить якісне прогнозоване формування регулярного мікрорельєфу на кожному етапі дослідження.
4. Розроблено методику проведення досліджень по кожному етапу комплексної оздоблювально-зміцнювальної обробки: наведено перелік технологічного обладнання, подано опис і технічні параметри обладнання, порядок та умови їх роботи, встановлено оптимальні режими роботи для кожного технологічного процесу.

5. Запропоновано вимірювальне обладнання та методику проведення теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню таких основних параметрів поверхні оброблених зразків, як: геометричні (шорсткість, характеристики мікрорельєфу), фізико-механічні (твердість, мікроструктура, залишкові напруги) та експлуатаційні (зносостійкість).

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

3.1. Розробка узагальненої логічної схеми в параметричному вигляді моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок і експлуатаційних властивостей циліндричних деталей

Одним із найбільш важливих показників інтегральної обкладинки є контурна стабільність, яка характеризується відхиленням зовнішніх контурів від прямокутної побудови. Цей параметр формується під час проходження заготовки обкладинки через механізм координувально-транспортувального блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок. Зазначений показник залежить як від витратних матеріалів (папір, картон-хромерзац, клей, термоклей), так і від тиражу, а також від геометричних і фізико-механічних параметрів контактуючих з обкладинкою деталей координувально-транспортувального блоку.

Для встановлення взаємозв'язку з метою прогнозування, а в подальшому і керування не тільки контурною стабільністю, а й експлуатаційними властивостями деталей, розроблена узагальнена логічна схема моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок і експлуатаційних властивостей циліндричних деталей (рис. 3.1).

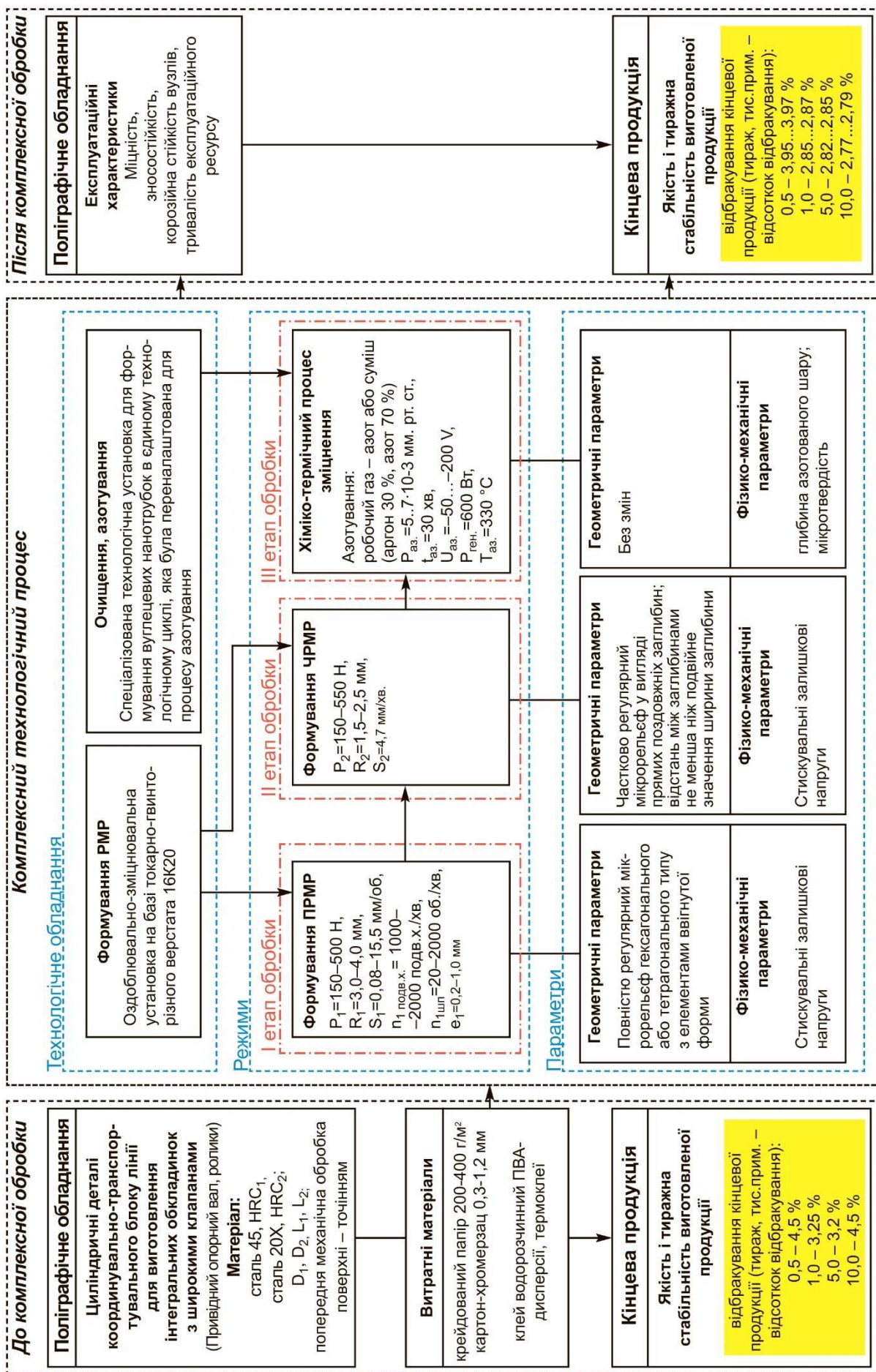


Рис. 3.1. Узагальнена логічна схема в параметричному вигляді моделювання процесів технологічного забезпечення контурної стабільності обкладинок та експлуатаційних властивостей циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних клапанів з широкими клапанами

На схемі наведено вплив комплексної технології ОЗО на експлуатаційні характеристики поліграфічного обладнання та якість кінцевої продукції. Підвищення показників якості обкладинок характеризується істотним зменшенням відсотка їх відбракування після застосування комплексного технологічного процесу ОЗО. Що підтверджує доцільність застосування такого технологічного процесу.

3.2. Розробка комплексної технології поверхневого зміцнення циліндричних деталей поліграфічного обладнання

Відомо декілька технологічних процесів для підвищення параметрів якості й експлуатаційних властивостей валів поліграфічного устаткування. Зокрема, один з них за сукупністю ознак є способом утворення регулярного мікрорельєфу на циліндричній деталі, який охоплює її обертання зі сталою швидкістю навколо своєї осі та формування частково регулярного мікрорельєфу [8]. Цей технологічний процес ОЗО полягає в тому, що на першому етапі на поверхні деталі виконують частково регулярний мікрорельєф з регулярними нерівностями, які не перетинаються. Радіус сфери деформувального інструмента $R = 1,0\text{--}4,0$ мм, зусилля вдавлювання $P = 50\text{--}600$ Н, ексцентриситет деформувального інструмента $e = 0,4\text{--}1,5$ мм, кількість обертів шпинделя $n_{\text{шп}} = 20\text{--}150$ об./хв, частота осциляцій інструмента $n_{\text{подв.х}} = 1250\text{--}2648$ 1/хв і подача $S = 0,2\text{--}3$ мм/об. На другому етапі металеву поверхню хромують [9].

Недоліком цього технологічного процесу є те, що для утворення регулярного мікрорельєфу на поверхні деталей поліграфічного обладнання та збільшення відносної площі контакту за рахунок мікрогеометрії контактувальних поверхонь валів механізму транспортування та вихідного матеріалу потрібно докладати чималих зусиль.

Аналіз способів зміцнення залежно від матеріалів, з яких сконструйовані циліндричні деталі вузлів лінії для виготовлення

інтегральних обкладинок з широкими клапанами, а також від інших параметрів показав, що найбільш перспективною є комплексна технологія зміцнення, яка поєднує процеси вібраційної оздоблювально-зміцнювальної обробки та подальше нанесення антикорозійного покриття або дифузійну модифікацію поверхневих шарів, наприклад, шляхом азотування.

Запропоновано технологію комплексного поверхневого зміцнення, в основу якої поставлено завдання підвищити параметри якості та експлуатаційні властивості поверхневого шару циліндричних валів координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами, а також покращити позиціонування заготовок обкладинок у блоці. З урахуванням специфіки поліграфічного обладнання запропонована технологія передбачає три етапи:

- перший – утворення на поверхні деталі повністю регулярного мікрорельєфу (ПРМР) методом вібраційного обкатування;
- другий – формування на поверхні деталі з вже утвореним на ній ПРМР частково регулярного мікрорельєфу у вигляді поздовжніх заглибин для покращення позиціонування вихідного матеріалу (обкладинок) у напрямку фальцювально-склеювального блоку.
- третій, завершальний етап – модифікація приповерхневих шарів шляхом іонного азотування в плазмі геліконного розряду для додаткового зміцнення та підвищення корозійної стійкості.

Перший етап обробки передбачає утворення на поверхні валів повністю регулярного мікрорельєфу (ПРМР) гексагонального типу, що, згідно з ГОСТ 24773–81 належить: до класу – з елементами ввігнутої форми; до групи – новий мікрорельєф; до виду – сітчастий, до типу – шестикутний [80]. Застосування вібраційного обкатування на цьому етапі зумовлене універсальністю цього методу зміцнення поверхневих шарів металу з одночасним утворенням на поверхні регулярних мікрорельєфів. Метод вібраційного обкатування заснований на тонкому пластичному деформуванні

поверхневих шарів металу і складному відносному переміщенні оброблюваної деталі та деформувального елемента.

Завдяки одночасному незалежному варіюванню значень великої кількості параметрів режиму вібраційного обкатування можуть утворюватися регулярні мікрорельєфи різних видів. При цьому необмежено регулюються та змінюються значення стандартизованих і нестандартизованих геометричних параметрів якості поверхні [33].

Формування ЧРМР у вигляді поздовжніх заглибин на другому етапі комплексної обробки шляхом алмазного вигладжування зумовлене необхідністю точної подачі вихідних заготовок до фальцювально-склеювального блоку, оскільки проковзування заготовок між поверхнями валів координувально-транспортного блоку призводять до їх зміщення у вигляді перекосів і, як наслідок, фальцювання та склеювання відбувається не в чітко відведених для цього ділянках і кінцева продукція не відповідає необхідним якісним показникам.

Застосування модифікації приповерхневих шарів шляхом хіміко-термічних методів зміцнення, зокрема азотуванням, на третьому (завершальному) етапі комплексної технології поверхневого зміцнення обумовлене необхідністю збереження мікрогеометрії поверхневого шару при додатковому підвищенні його твердості.

Результати наукових робіт [81; 82] показують, що після обробки поверхні пластичним деформуванням утворюється значна кількість дефектів структури приповерхневого шару, які сприяють більш активній дифузії впроваджуваної речовини. Зазначені відомості отримані при використанні сучасних методів насичення поверхні азотом, заснованих на застосуванні інтенсивних потоків іонів, осаджуваних з плазми на деталь, що зміцнюється, або отриманих методами іонно-плазмової імплантації [83; 84]. Дефекти структури утворюються в такий спосіб. Приповерхневий шар сталеві деталі в початковому стані має чітко виражену феррито-перлітну структуру. У процесі ППД відбувається інтенсивна пластична деформація поверхневого шару сталі, у результаті чого під впливом деформувального інструмента

зерна поверхневого шару втрачають свою рівноосьову форму та витягуються в напрямі руху інструмента.

Виявлення найбільш перспективного й ефективного методу для третього (завершального) етапу комплексної зміцнювальної обробки, вибір та обґрунтування доцільності його застосування наведено в розділі 1, де подано аналіз сучасних методів хіміко-термічної обробки для зміцнення сталевих деталей, що працюють в умовах тертя та піддаються високим фізичним і хімічним навантаженням.

Одним з основних параметрів ПРМР, який впливає на зносостійкість та інші експлуатаційні властивості поверхонь, є відносна опорна площа поверхні, що її займають регулярні нерівності. Відносна опорна площа – це відношення площі регулярних нерівностей (отриманих у результаті перших двох етапів обробки) до площі поверхні деталі, яка оброблюється. Визначення залежності відносної опорної площі поверхні від геометричних параметрів елементів мікрорельєфу та радіуса сфери деформувального елемента дозволить отримувати поверхню з прогнозованими фізико-механічними властивостями.

Обробка циліндричної поверхні валу, на відміну від відомих традиційних процесів віброобкатування, здійснюється у два етапи.

Перший етап обробки передбачає утворення на поверхні валу ПРМР гексагонального типу з такими параметрами технологічного процесу:

- радіус сфери індентора (деформувального інструмента) $R = 3,0\text{--}4,0$ мм;
- зусилля при вдавлюванні $P = 150\text{--}500$ Н;
- ексцентриситет інструмента $e = 0,2\text{--}1,0$ мм;
- частота обертання шпинделя $n_{\text{шп}} = 20\text{--}2000$ об./хв;
- частота осциляцій деформувального інструмента $n_{\text{подв.х}} = 1000\text{--}2000$ подв.х./хв;
- подача інструмента $S = 0,08\text{--}15,5$ мм/об. [85].

Складний рух індентора відносно оброблюваної поверхні та контактування з різних боків з кожним виступом мікронерівностей вихідної поверхні (рис. 3.2) спричиняє утворення ПРМР гексагонального типу

ввігнутої форми (рис. 3.3, а). При цьому метал піддається пластичному деформуванню в різних напрямках.

Також на рис. 3.3, б, в та рис. 3.4 подано приклади формування ЧРМР за різних параметрів технологічного процесу.

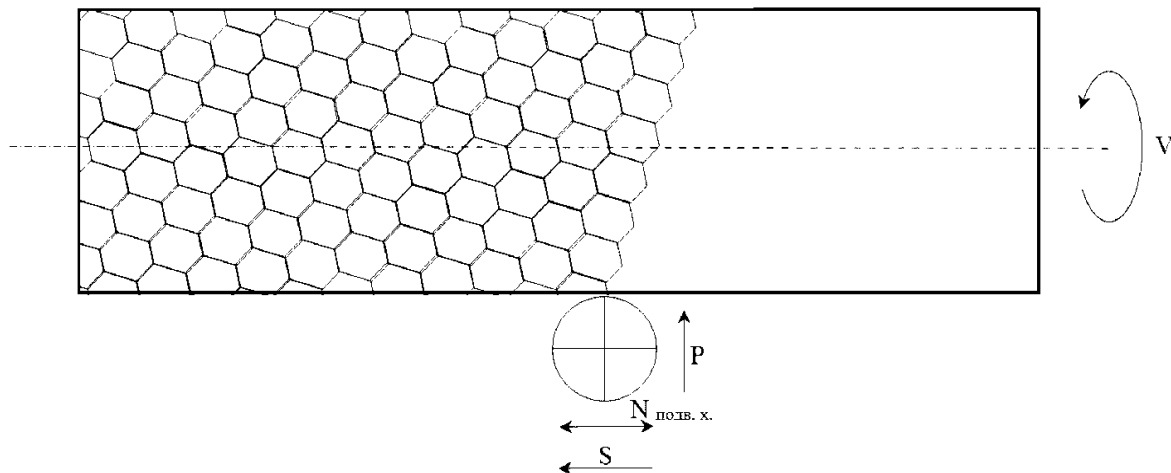


Рис. 3.2. Спосіб утворення повністю регулярного мікрорельєфу

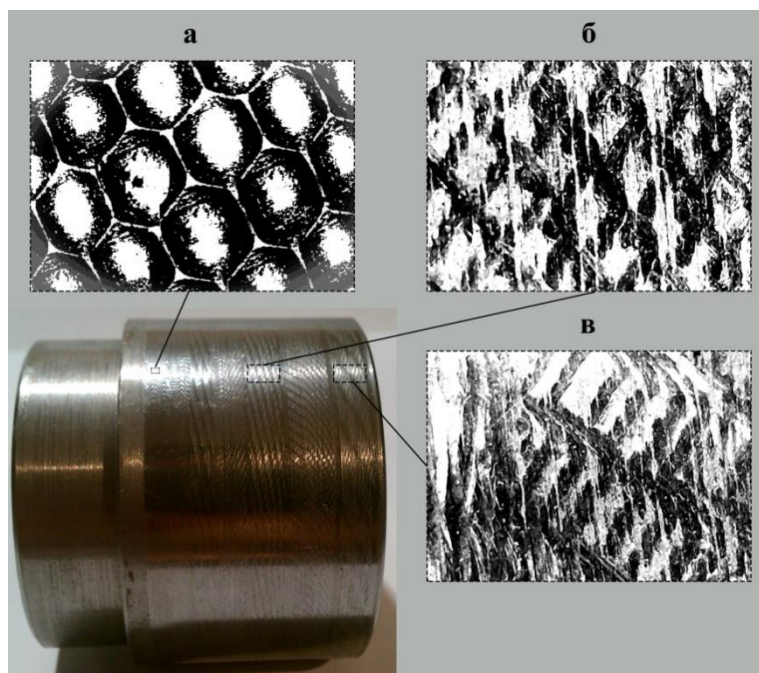


Рис. 3.3. Заготовка з ділянками нанесеного РМР: а – ПРМР гексагонального типу ввігнутої форми; б, в – ЧРМР

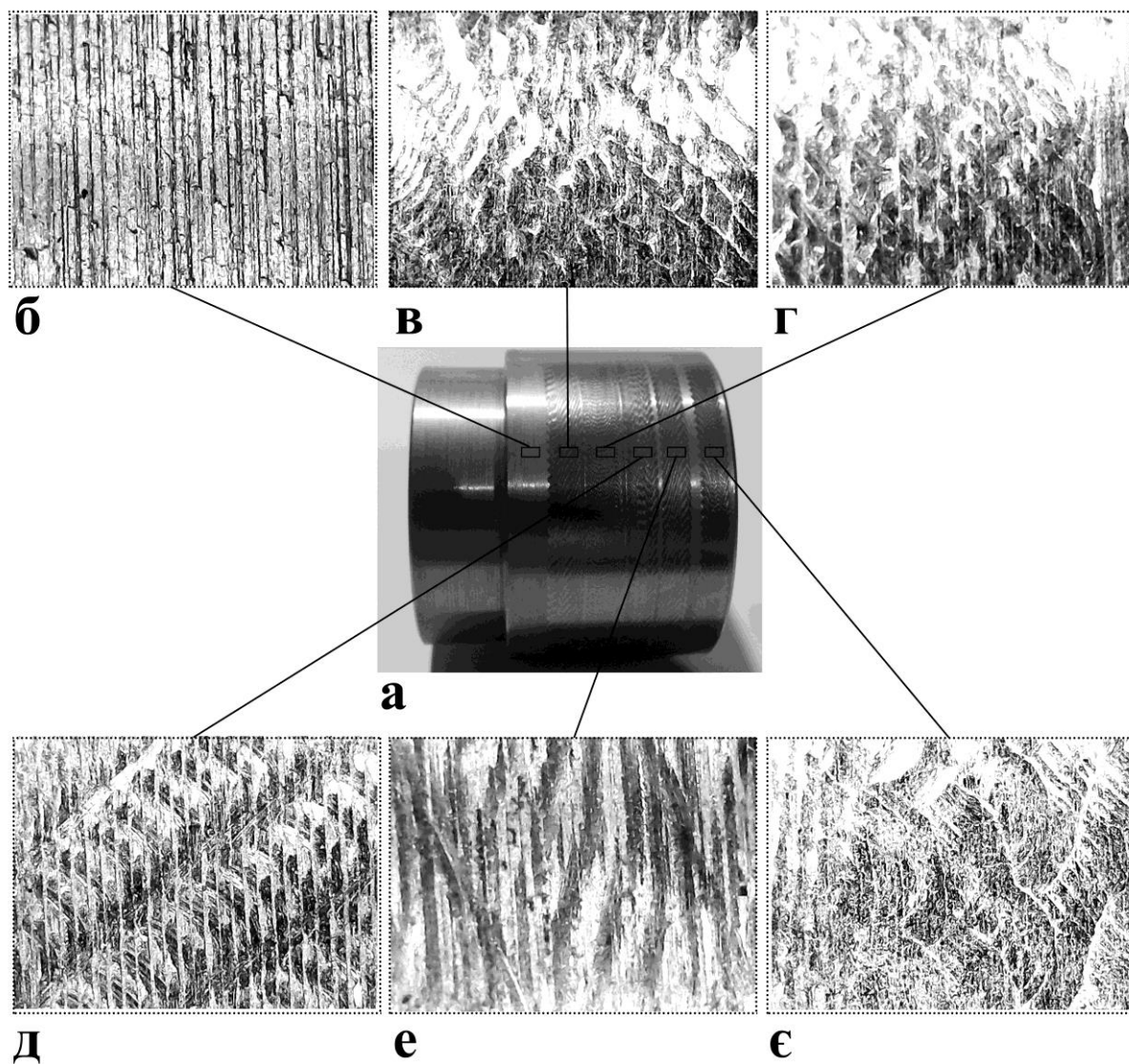


Рис. 3.4. Заготовка (а) з ділянками: б – у початковому стані; в–є – з утвореним ЧРМР при різних параметрах технологічного процесу

Такий підхід дозволяє зменшити опір деформуванню та збільшити інтенсивність пластичної деформації, а це дає змогу створювати оптимальний мікрорельєф під час обробки деталей і досягати істотного зміцнення поверхні заготовки без її значної загальної деформації.

Другий етап зміцнювальної обробки передбачає утворення на поверхні валу з ПРМР частково регулярного мікрорельєфу, який займає площу не менше 30 % від загальної площі поверхні валу та має вигляд прямих заглибин, розташованих паралельно до осі валу на відстані одна від одної не менше $2b$. Глибина заглибин $h = 0,006\text{--}0,009$ мм, ширина $b = 0,35\text{--}0,5$ мм і

висота напливів 0,0017–0,0040 мм. Зусилля вдавлювання індентора $P = 150\text{--}550$ Н, радіус сфери індентора $R = 1,5\text{--}2,5$ мм (рис. 3.5).

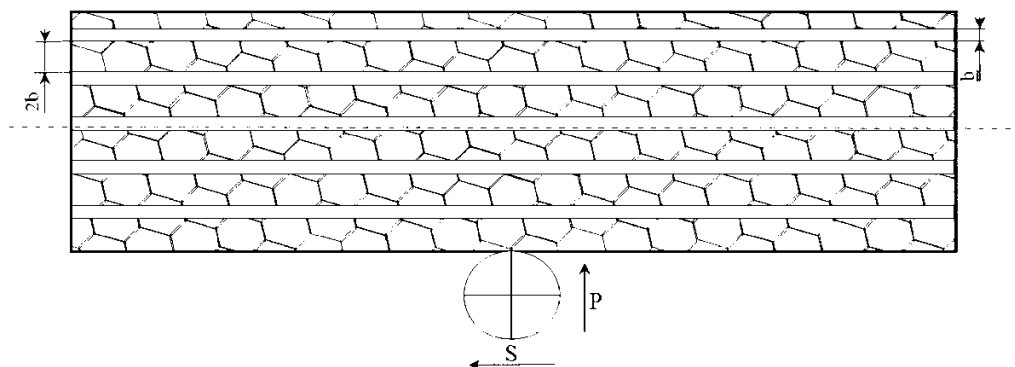
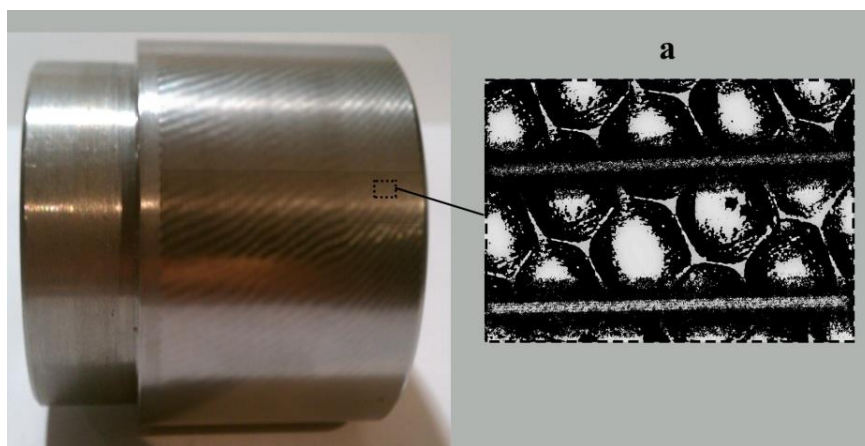


Рис. 3.5. Спосіб утворення частково регулярного мікрорельєфу на поверхні з повністю регулярним мікрорельєфом

Після другого етапу обробки утворені у вигляді прямих заглибин ділянки згладжують мікрорельєф гексагонального типу завдяки повторному прикладанню зусилля деформування. На поверхні утворюється новий мікрорельєф (рис. 3.6), геометричні параметри якого (висота, форма, розташування мікронерівностей) визначаються як величиною зусилля, так і радіусом сфери індентора, швидкістю, подачею, числом осциляцій та амплітудою коливання інструмента [85]. Залежність геометричних параметрів мікрорельєфу від зазначених параметрів технологічного процесу встановлено аналітично й експериментально та наведено нижче.





2)

Рис. 3.6. 1) Заготовка з ділянкою ЧРМР у вигляді поздовжніх заглиблень, нанесеною на ПРМР; 2) Приклади утворення ЧРМР у вигляді поздовжніх заглиблень.

Третій етап комплексної зміцнювальної обробки передбачає додаткове підвищення мікротвердості поверхні деталей завдяки модифікації їх приповерхневих шарів іонним азотуванням у геліконному розряді. Цей інноваційний метод досліджувався нами вперше та має значні переваги над відомими нині методами азотування (енергоефективність [86], швидкість технологічного процесу та ін.) [63].

3.3. Встановлення аналітичних залежностей геометричних параметрів мікрорельєфу від параметрів технологічного процесу обробки

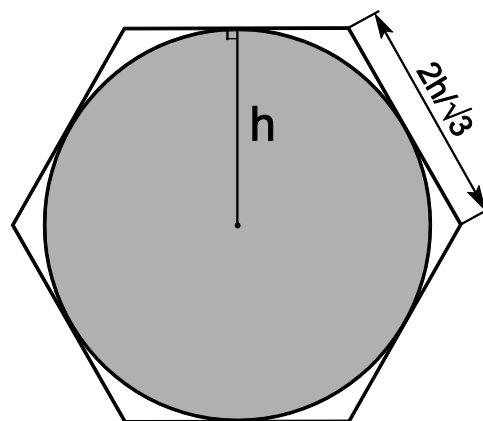
У наукових працях Ю. Г. Шнейдера, Є. В. Рижова, В. А. Горохова встановлено аналітичні залежності між геометричними параметрами РМР й технологічними режимами його формування [87–89], але для розробленого нами технологічного процесу [90] виникає необхідність встановлення залежності відносної опорної площі циліндричних поверхонь валів від технологічних параметрів процесу обробки, з урахуванням специфіки запропонованої технології.

Встановлення аналітичної залежності між режимами обробки (геометричними параметрами елементів мікрорельєфу та радіуса сфери

деформувального елемента) та відносною опорною площею поверхні дозволить завдяки регулюванню параметрів прогнозовано впливати на якість поверхонь залежно від їх експлуатаційних властивостей [85].

Перейдемо до розрахунку відносної опорної площі нерівностей, отриманих після двох етапів обробки, та їх залежності від геометричних параметрів одиниці площі отриманого мікрорельєфу (базового елемента) з урахуванням радіуса сфери деформувального елемента [85].

Спочатку обчислимо площу базового елемента, який при вигляді зверху має форму правильного шестикутника. Його отримано після вдавлювання в поверхню деталі заготовки сферичного індентора радіусом R (рис. 3.7, 3.8).



Нехай шестикутник має висоту h (у нашому випадку висота – це відстань від його центру до сторони). Відповідно, довжина сторони $= \frac{2h}{\sqrt{3}}$.

Рис. 3.7. Вигляд зверху на базовий елемент поверхні ПРМР гексагонального типу

Далі розраховуємо площу заглибини базового елемента (заштрихована зона) без урахування рівнів перетину поверхні з РМР. Її площа дорівнює $2\pi R H$, де H – висота заглибини.

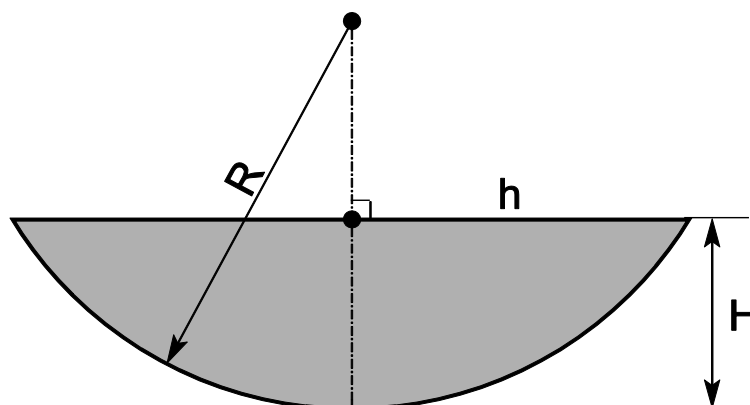


Рис. 3.8. Вигляд спереду на заглибину базового елемента поверхні ПРМР

У нашому випадку

$$H = R - \sqrt{R^2 - h^2},$$

тому

$$S_{\text{зашт.}} = 2\pi R \left(R - \sqrt{R^2 - h^2} \right).$$

Після цього обчислюємо P – площу рівнів перетину поверхні з ПРМР (незаштрихована зона), яка складається з 12 криволінійних трикутників, один з яких заштрихований на рис. 3.3. Далі визначаємо площу цього трикутника.

Введемо кути α та β , як показано на рис. 3.9 та рис. 3.10. При невеликих змінах цих кутів на $d\alpha$ і $d\beta$ покривається прямокутник зі сторонами $(R \sin \beta - d\alpha)$ і $R d\beta$.

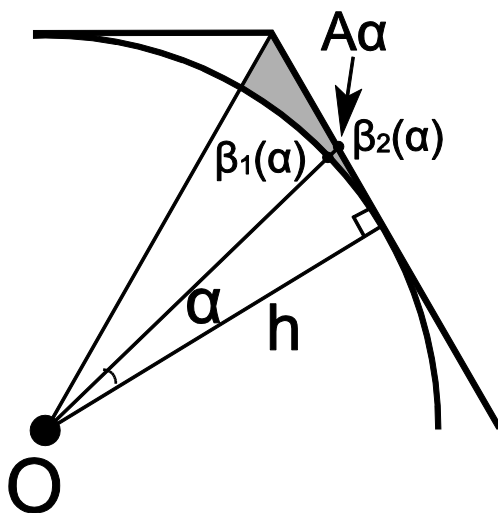


Рис. 3.9. Вигляд зверху на рівні перетину поверхні з ПРМР

Тому

$$S_P = 12 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \int_{\beta_2(\alpha)}^{\beta_1(\alpha)} R^2 \sin \beta d\beta d\alpha.$$

Межі інтегрування для α змінюються від 0 до $\pi/6$, а для β – від $\beta_1(\alpha)$ до $\beta_2(\alpha)$ (рис. 3.9).

Зазначимо, що

$$\beta_1(\alpha) = \arcsin\left(\frac{h}{R}\right)$$

та

$$\beta_2(\alpha) = \arcsin\left(\frac{OA_\alpha}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{\frac{h}{\cos\alpha}}{R}\right),$$

тобто

$$\beta_2(\alpha) = \arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right).$$

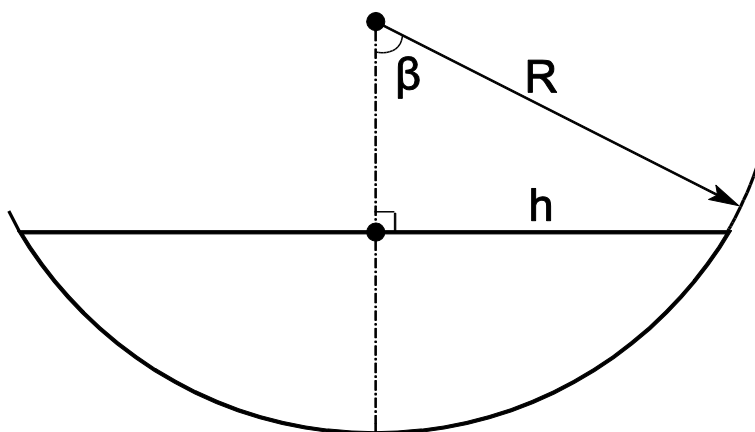


Рис. 3.10. Вигляд спереду на заглибину базового елемента та на рівні перетину поверхні з ПРМР

Таким чином, площа рівнів перетину поверхні з РМР (позначимо її $S_{n.}$) дорівнює:

$$\begin{aligned} S_{n.} &= 12 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \int_{\arcsin\left(\frac{h}{R}\right)}^{\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)} R^2 \sin\beta \, d\beta \, d\alpha = 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(-\cos\beta \Big|_{\beta=\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)}^{\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)} \right) d\alpha = \\ &= 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\cos\left(\arcsin\left(\frac{h}{R}\right)\right) - \cos\left(\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)\right) \right) d\alpha. \end{aligned}$$

Зауважимо, що $\cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$ (для $x \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$),

тому $\cos(\arcsin x) = \sqrt{1 - \sin^2(\arcsin x)} = \sqrt{1 - x^2}$.

Таким чином,

$$\begin{aligned} S_{n.} &= 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}} \right) d\alpha = \\ &= 12R^2 \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}}}{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}}} \right) d\alpha. \end{aligned}$$

Перетворимо вираз під інтегралом:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}}}{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}}} &= 1 - \frac{\sqrt{\frac{R^2 \cos^2 \alpha - h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}}}{\sqrt{\frac{R^2 - h^2}{R^2}}} = 1 - \frac{\sqrt{(R^2 \cos^2 \alpha - h^2) R^2}}{\sqrt{(R^2 - h^2) R^2 \cos^2 \alpha}} = \\ &= 1 - \sqrt{\frac{R^2 \cos^2 \alpha - h^2}{(R^2 - h^2) \cos^2 \alpha}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 (1 - \cos^2 \alpha)}{(R^2 - h^2) \cos^2 \alpha}} = \\ &= 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 \sin^2 \alpha}{(R^2 - h^2) \cos^2 \alpha}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{(R^2 - h^2)}}. \end{aligned}$$

Тобто:

$$S_{n.} = 12R^2 \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h^2}{(R^2 - h^2)} \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) d\alpha.$$

Цей інтеграл не обчислюється в елементарних функціях, тому обчислимо його наближено за допомогою формули:

$$\sqrt{1 - z} \approx 1 - \frac{z}{2}, \text{ придатну для } |z| \ll 1.$$

Маємо:

$$S_{n.} \approx 12R^2 \frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{R} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{h^2}{2(R^2 - h^2)} \operatorname{tg}^2 \alpha d\alpha =$$

$$\begin{aligned}
&= 6R\sqrt{R^2 - h^2} \cdot \frac{h^2}{R^2 - h^2} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \operatorname{tg}^2 \alpha d\alpha = \frac{6Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1 \right) d\alpha = \\
&= \frac{6Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} (\operatorname{tg} \alpha - \alpha) \Big|_{\alpha=0}^{\frac{\pi}{6}} = \frac{6Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\pi}{6} \right) = \frac{Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} (2\sqrt{3} - \pi).
\end{aligned}$$

Повна площа:

$$S_{з.} = S_{загл.} + S_n \approx 2\pi R \left(R - \sqrt{R^2 - h^2} \right) + \frac{Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} (2\sqrt{3} - \pi).$$

Обчислимо відносну опорну площу (площу рельєфної поверхні, поділену на площу плоскої):

$$\begin{aligned}
\rho_1 &= \frac{S_{з.}}{S_{шестигутника}} \approx \frac{2\pi R \left(R - \sqrt{R^2 - h^2} \right) + \frac{Rh^2 (2\sqrt{3} - \pi)}{\sqrt{R^2 - h^2}}}{3h \cdot \frac{2h}{\sqrt{3}}} = \\
&= \frac{2\pi R \frac{R^2 - (R^2 - h^2)}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + (2\sqrt{3} - \pi) \frac{Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}}}{2\sqrt{3}h^2} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \times \frac{R}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \frac{R}{\sqrt{R^2 - h^2}}
\end{aligned}$$

Далі обчислимо відносну площу поздовжньої заглибини шириною b , продавлену індентором, що має радіус деформувального елемента R_2 (рис. 3.11).

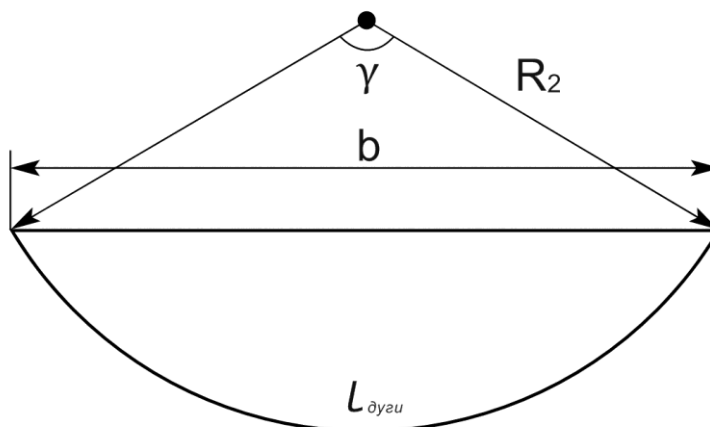


Рис. 3.11. Вигляд спереду на поздовжню заглибину, утворену на другому етапі обробки

Де

$$\rho_2 = \frac{l_{\text{дуги}}}{b} = \frac{R_2 \gamma}{b} = \frac{R_2 \cdot 2 \arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right)}{b}.$$

Маємо:

$$\rho_2 = \frac{2R_2}{b} \arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right).$$

Площа ПРМР гексагонального типу займає 2/3 від загальної площі, а мікрорельєф, нанесений у вигляді поздовжніх заглиблень, – 1/3 площі. Тому загальна відносна опорна площа:

$$\rho = \frac{2}{3}\rho_1 + \frac{1}{3}\rho_2 \approx \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \times \frac{R}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + \left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{3\sqrt{3}}\right) \frac{R}{\sqrt{R^2 - h^2}} + \frac{2R_2}{3b} \arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right).$$

Установлена аналітична залежність між геометричними параметрами елементів мікрорельєфу, радіусом сфери деформувального елемента та відносною опорною площею поверхні після комбінованої двохетапної зміцнювальної обробки пластичним деформуванням дозволяє (завдяки регулюванню параметрів) прогнозовано впливати на якість поверхонь залежно від їх експлуатаційних властивостей [85].

Значно підвищити зносостійкість валів поліграфічного обладнання може наступна технологічна операція – іонне азотування, яка запропонована, як завершальна стадія обробки (третій етап). Ця технологічна операція має суттєві переваги порівняно з традиційними процесами пічного насичення з газової фази:

- велику швидкість перебігу процесу (у 1,5–2 рази швидше);
- можливість проводити регульовані процеси азотування з оптимізацією дифузійних шарів за фазовим складом і будовою з урахуванням умов експлуатації деталей;
- мінімальні деформації виробів у процесі обробки та збереження вихідного класу чистоти поверхні;

- велику економічність та екологічність процесу, значно нижче енергоспоживання, скорочення витрат насичувальних газів у робочій установці [91].

Переваги іонного азотування в плазмі тліючого розряду порівняно з традиційними процесами азотування, їх сутність і галузі застосування наведено в роботах [92–103]. Проте, на сьогоднішній день немає досліджень процесу азотування в плазмі геліконного розряду, застосування якого є вельми перспективним через: високу густину плазми, широкі можливості регулювання енергії, складу іонного потоку, енергоощадливість, сталість функціонування в широкому діапазоні тисків газу та напруги, можливість спрямовувати потік іонів під різними кутами до азотованої поверхні. Перелічені можливості геліконного розряду роблять привабливим його використання в іонно-плазмових технологіях.

3.4. Алгоритм комплексного технологічного процесу поверхневої обробки циліндричних деталей поліграфічного обладнання

Задля цілеспрямованого керування комплексним технологічним процесом ОЗО циліндричних поверхонь обладнання для виготовлення обкладинок нами розроблено узагальнений алгоритм керування процесом поліпшення якості й експлуатаційних властивостей деталей координувально-транспортного вузла лінії з виготовлення інтегральних обкладинок шляхом реалізації трьохетапної комплексної технології їх поверхневої обробки (рис. 3.12). Ця технологія поєднує в собі процеси обробки ППД та інноваційний метод іонного азотування [104] в плазмі геліконного розряду [105].

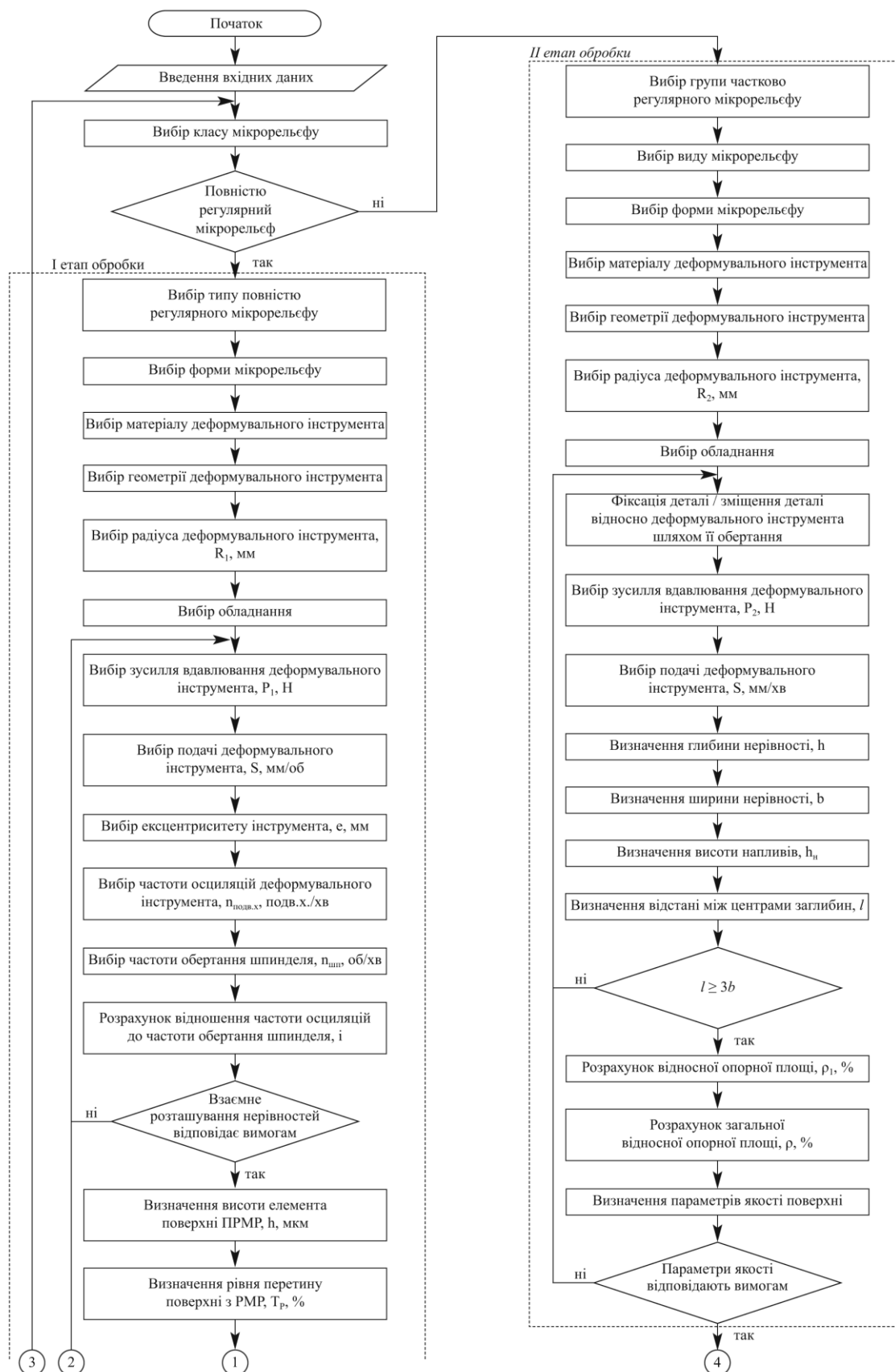


Рис. 3.12. Узагальнений алгоритм керування комплексним технологічним процесом поверхневої обробки циліндричних деталей поліграфічного обладнання (початок)

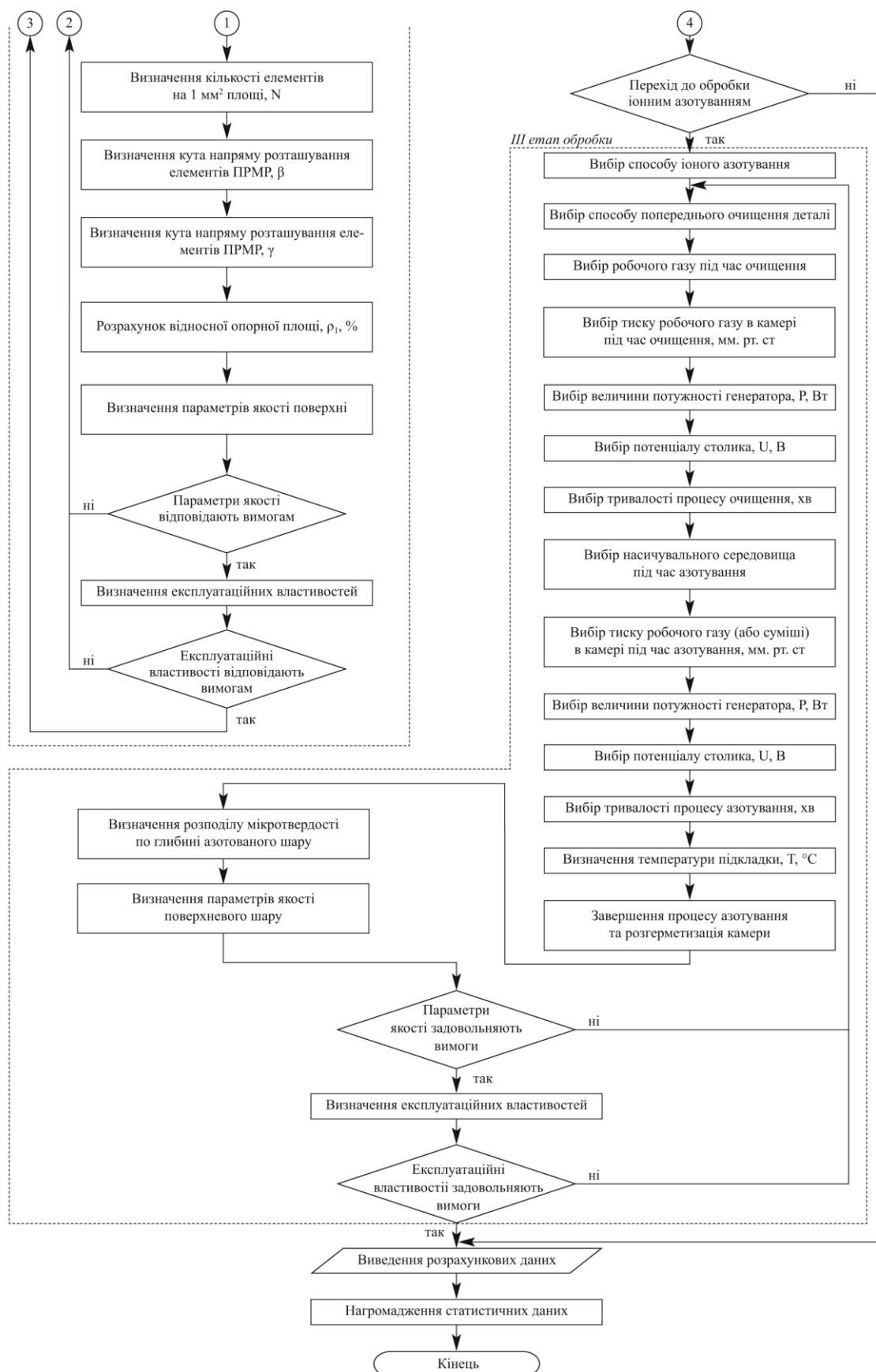


Рис. 3.12. Узагальнений алгоритм керування комплексним технологічним процесом поверхневої обробки циліндричних деталей поліграфічного обладнання (закінчення)

Алгоритм передбачає виконання дій у такій послідовності. Спочатку вводимо вхідні дані: матеріал оброблюваної циліндричної деталі, її діаметр (D), мм, довжину (L), мм, твердість (HRC); середнє арифметичне відхилення профілю (R_a), мкм. Після цього вибираємо клас мікрорельєфу залежно від етапу обробки: на першому етапі – повністю регулярний мікрорельєф, а на другому, відповідно, – частково регулярний мікрорельєф, який реалізується у вигляді поздовжніх заглибин. При виконанні умови «повністю регулярний мікрорельєф» переходимо до наступного кроку. В іншому разі здійснюємо перехід до «вибору групи частково регулярного мікрорельєфу». Цей крок визначає послідовне застосування перших двох етапів комплексного технологічного процесу поверхневого зміцнення шляхом пластичного деформування [106].

Далі обираємо тип повністю регулярного мікрорельєфу (чотирикутний або гексагональний) і його форму, яка може бути ввігнутою або випуклою.

Наступний крок – вибір матеріалу деформувального інструмента та його геометрії, що дає змогу обрати алмазний чи твердосплавний наконечник, або сталеву загартовану кульку з формами поверхні, як-от конус, циліндр, сфера чи круговий тор. Вибір радіуса деформувального інструмента залежить від твердості матеріалу, з якого виготовлена деталь. Згідно із запропонованим комплексним технологічним процесом, твердість деталі не повинна мати твердість нижчу, ніж HRC 48..52, але вона може досягати і HRC 63..66. Якщо твердість матеріалу не виходить за межі HRC 50..65, то радіус робочої поверхні деформувального інструмента вибираємо в межах $R_1 = 0,5\text{--}1$ мм. При твердості матеріалу деталі в межах HRC 32..50 – радіус робочої поверхні деформувального інструмента (R_1) має становити 2–4 мм.

Після вибору деформувального інструменту обираємо обладнання для вібраційної обробки деталі (токарно-гвинторізальний верстат). Згідно з розрахунками та статистичними даними, робимо вибір зусилля вдавлювання деформувального інструмента в діапазоні $P_1 = 150\text{--}500$ Н. При цьому величина швидкості подачі деформувального інструмента, залежно від

технічних характеристик токарно-гвинторізного верстата, має бути в межах $S = 0,08\text{--}12,5$ мм/об. Відповідно до технічних характеристик токарно-гвинторізного верстата, ексцентриситет інструмента не повинен виходити за межі $e = 0,2\text{--}1,0$ мм, а частота осциляцій має становити $n_{\text{подв.х}} = 1000\text{--}2000$ подв./хв при обертанні шпинделя з частотою в діапазоні $n_{\text{шп}} = 25\text{--}2000$ об./хв.

Відношення частоти осциляцій до частоти обертання шпинделя верстата розраховуємо за такою формулою: $i = \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}}$.

Якщо взаємне розташування нерівностей відповідає необхідним вимогам, то переходимо до наступного кроку, в іншому випадку – повертаємось до кроку «Вибір зусилля вдавлювання деформувального інструмента, P_1 » [106].

Числове значення висоти елемента мікрорельєфу R_e вибираємо зі стандартизованого ряду значень: 1000, 800, 630, 500, 400, 100, 80, ..., 0,100, 0,080, 0,063, 0,050, 0,040. Згідно з ГОСТ 24773–81, вибір числового значення рівня перетину поверхні з регулярним мікрорельєфом робимо з ряду: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80 % від значення висоти елемента [80]. Кількість елементів на одиницю площі (1 мм^2) N вибираємо зі стандартизованого ряду значень: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 % [80]. Діапазон кутів напряду розміщення елементів ПРМР β та γ повинен бути в межах $0\text{--}180^\circ$.

Визначення відносної опорної площі поверхні з ПРМР ρ_1 після завершення першого етапу комплексної обробки проводимо за аналітичною залежністю [106]:

$$\rho_1 = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) \frac{R}{\sqrt{R^2 - h^2}}.$$

Параметри якості поверхні визначаємо за допомогою статистичних даних. Якщо вони відповідають усім вимогам, переходимо до наступного кроку, якщо ні, то повертаємось до кроку «вибір зусилля вдавлювання деформувального інструмента, P_1 ».

На основі статистичних даних визначаємо також експлуатаційні властивості поверхні. Якщо вони задовольняють умову відповідності вимогам експлуатаційних властивостей, переходимо до наступного кроку. За невиконання цієї вимоги, здійснюємо перехід до кроку «вибір зусилля вдавлювання деформувального інструмента, P_1 ».

Наступний крок – перехід на другий етап комплексної обробки, на якому обираємо групу ЧРМР. Оскільки умова «повністю регулярний мікрорельєф» при цьому не виконується, то переходимо до кроку «вибір групи частково регулярного мікрорельєфу», який, згідно з ГОСТ 24773–81, обираємо у групі ЧРМР з дискретними регулярними нерівностями [80; 106]. Цей вид нестандартизованого мікрорельєфу формується у вигляді поздовжніх заглиблень, розташованих паралельно до осі обертання циліндричної деталі на відстані одна від одної не менше подвійного значення ширини заглиблення. При цьому площа заглиблень не повинна перевищувати 30 % площі всієї поверхні деталі.

Матеріал деформувального інструмента та його геометрія мають бути такими: алмазний чи твердосплавний наконечник, або сталева загартована кулька та, відповідно, конус, циліндр, сфера або круговий тор. Від твердості матеріалу оброблюваної деталі залежить радіус деформувального інструмента. Якщо твердість матеріалу деталі становить HRC 50..65, то радіус робочої поверхні деформувального інструмента повинен бути в межах $R_2 = 0,5\text{--}1$ мм. За твердості матеріалу в межах HRC 32..50 – радіус робочої поверхні деформувального інструмента потрібно обирати $R_2 = 1,5\text{--}4$ мм. У нашому випадку $R_2 = 1,5\text{--}2,5$ мм.

На цьому етапі зміцнювальної обробки використовуємо токарно-гвинторізний верстат, тобто таке саме обладнання, як і на першому.

Фіксація деталі в затискачах верстата здійснюється з послідовним зміщенням її після кожного проходу деформувального інструмента відносно робочої поверхні шляхом обертання деталі навколо своєї осі. Зазначимо, що відстань між утвореними заглибинами повинна бути більшою, ніж величина подвійної ширини заглибини. Зусилля вдавлювання деформувального

інструмента підбираються в діапазоні $P_2 = 75\text{--}500$ Н. При цьому значення швидкості його подачі обирається з урахуванням технічних характеристик токарно-гвинторізного верстата та з вимкненим обертанням шпинделя ($n_{\text{шп}} = 0$ об./хв) в межах $S = 0,2\text{--}7,5$ мм/хв.

Визначення глибини нерівності h , ширини нерівності b та висоти напливів h_n здійснюємо за експериментально встановленими залежностями від зусиль вдавлювання деформувального інструмента та радіусів його робочої поверхні [90].

Наступний крок – визначення відстані між утвореними заглибинами (рис. 3.13). Для переходу до цього кроку необхідно, щоб відстань між центрами утворених заглибин (l) була не меншою, ніж потрійне значення ширини заглибини ($l \geq 3b$). За невиконання вказаної умови деталь фіксуємо в іншому положенні та переходимо до кроку «фіксація деталі / зміщення деталі відносно деформувального інструмента шляхом її обертання».

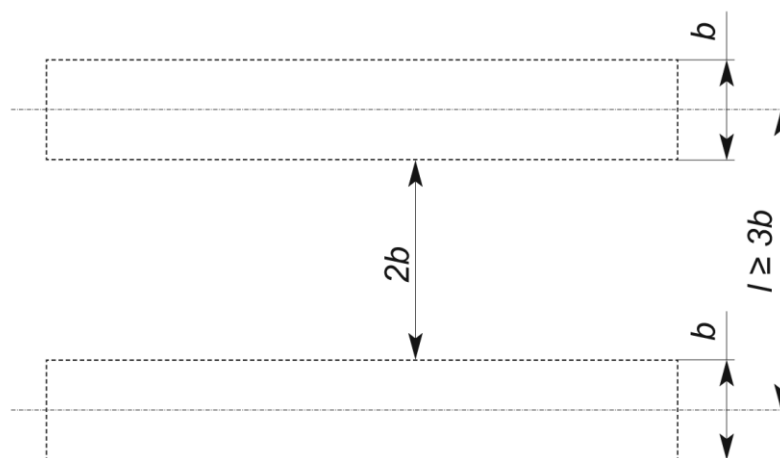


Рис. 3.13. Відстань між поздовжніми нерівностями, утвореними на другому етапі обробки

Обчислення відносної опорної площі поверхні з ЧРМР після завершення другого етапу комплексної обробки ρ_2 проводимо за аналітичною залежністю [85]:

$$\rho_2 = \frac{2R_2}{b} \arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right).$$

Розрахунок загальної відносної опорної площі поверхні з РМР після завершення другого етапу комплексної обробки ρ проводимо за формулою, виведеною в роботі [85]:

$$\rho = \frac{2}{3}\rho_1 + \frac{1}{3}\rho_2 \approx \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \times \frac{R}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + \left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right) \frac{R}{\sqrt{R^2 - h^2}} + \frac{2R_2}{3b} \arcsin\left(\frac{b}{2R_2} \right).$$

На основі статистичних даних визначаємо параметри якості поверхні. Перевіряємо умову «параметри якості відповідають вимогам». Якщо вона виконується, то переходимо до наступного кроку. Якщо ні, то повертаємось до кроку «фіксація деталі / зміщення деталі відносно деформувального інструмента шляхом її обертання» [106].

Після другого етапу обробки можна перейти до наступного етапу, або ж завершити обробку, перейшовши до виведення розрахункових даних.

Перехід до третього, заключного етапу комплексної обробки (його детальний опис: обладнання, технологія та ін. – наведено у розд. 2 та в статтях [51, 107]) здійснюємо кроком «вибір способу іонного азотування». При цьому для попереднього очищення деталі обираємо плазму в середовищі газу, або їх суміші. Під час очищення використовується газ аргон, значення тиску якого в камері становить $7 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст., а сам процес триває 5 хв при потужності генератора $P = 600$ Вт і значенні потенціалу столика $U = -50$ В.

Після попереднього очищення без вилучення зразка з камери обробки починається процес азотування. Вибір насичувального середовища під час азотування здійснюємо з-поміж азоту або суміші аргону з азотом (аргон 30 %, азот 70 %). Азотування проводиться при тиску робочого газу в камері в діапазоні $5..7 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст., потужність генератора становить $P = 600$ Вт, а вибір потенціалу столика здійснюється в діапазоні $-50...-200$ В, або «плаваючий». Оптимальна тривалість процесу азотування – 30 хв. Під час азотування визначаємо температуру підкладки, максимальне значення якої становить $T=330$ °С. Після завершення процесу розгерметизовуємо камеру та вилучаємо з неї оброблену деталь [51].

Після вилучення деталі проводимо вимірювання мікротвердості її поверхневого шару та визначаємо розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару.

Далі визначаємо параметри якості поверхневого шару. Якщо вони задовольняють вимоги – переходимо до наступного кроку. В іншому разі повертаємося до кроку «вибір способу попереднього очищення деталі».

Визначаємо експлуатаційні властивості деталі: зносостійкість, корозійну стійкість і контактну жорсткість, після чого перевіряємо умову «експлуатаційні властивості задовольняють вимоги». Якщо цю умову виконано, переходимо до наступного кроку, в іншому разі переходимо до кроку «вибір способу попереднього очищення деталі».

Завершальні кроки – уведення розрахункових даних і накопичення статистичних даних.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено узагальнену логічну схему в параметричному вигляді моделювання технологічного забезпечення і взаємозв'язку якості та експлуатаційних властивостей деталей механізму координувально-транспортного блоку, а також показників якості обкладинок.

2. Розроблено комплексний технологічний процес ОЗО циліндричних деталей координувально-транспортного механізму лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами. Процес складається з трьох послідовних етапів обробки поверхні і приповерхневих шарів:

- перший – обробка вібраційним обкатуванням для утворення на поверхні ПРМР, що підвищує якість і експлуатаційні властивості деталей;
- другий – утворення поздовжніх заглибин шляхом алмазного вигладжування для підвищення точності подачі матеріалу;

- третій – модифікація поверхні шляхом іонного азотування в плазмі геліконного розряду, що дозволяє значно підвищити такі показники поверхні, як твердість, корозійну стійкість і зносостійкість без зміни її геометричних параметрів.

3. Встановлено аналітичну залежність між режимами обробки (геометричними параметрами елементів мікрорельєфу та радіуса сфери деформувального елемента) та відносною опорною площею поверхні. Це дозволить прогнозовано впливати на якість поверхні, залежно від її експлуатаційних властивостей, завдяки регулюванню параметрів режимів обробки.

4. Розроблено узагальнений алгоритм керування комплексним технологічним процесом ОЗО циліндричних деталей поліграфічного обладнання, який дозволить прогнозовано впливати на якість поверхні деталей та їх експлуатаційні властивості на кожному етапі.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ КООРДИНУВАЛЬНО-ТРАНСПОРТУВАЛЬНОГО БЛОКУ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК З ШИРОКИМИ КЛАПАНАМИ

4.1. Багатофакторне планування експерименту

Методи математичного моделювання дозволяють досягти значного скорочення обсягів експериментального дослідження, також вони слугують інструментом для визначення найбільш раціональних параметрів технологічних процесів виробництва.

Мета використання математичної моделі в нашому дослідженні – визначення оптимальних параметрів комплексного трьохетапного технологічного процесу зміцнення та їх вплив на зносостійкість поверхні циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами.

Зношування є складним багатофакторним процесом, який характеризується різноманітними керованими факторами та складними кореляційними зв'язками між ними. Дослідження зносостійкості проводили з використанням багатофакторного експерименту, оскільки при застосуванні комплексної технології зміцнення має місце чітко виражена залежність зношування від фізико-механічних властивостей деталей після кожного етапу обробки і від параметрів обробки, які формують ці властивості на кожному з етапів. Для моделювання та оптимізації складних багатофакторних залежностей використовується регресійний аналіз [108–112] і планування експериментів [111; 113; 114], які мають досить широке застосування в моделюванні технологічних процесів [114–118]. При цьому, незважаючи на наявність великої кількості літератури щодо застосування планування експерименту в технології машинобудування [118–121], більшість

дослідників використовують неефективні та застарілі плани експерименту для дослідження складних процесів [118; 121].

Зв'язок вхідних і вихідних параметрів має вигляд функції відгуку типу

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

де x_1, x_2, \dots, x_k – керовані фактори, які впливають на відгук системи. Їх можна варіювати в процесі експерименту або ж фіксувати на певному рівні (приклад факторів: радіуси деформувального інструмента, зусилля вдавлювання, величина подачі на кожному з початкових двох етапів обробки ППД; товщина азотованого шару).

Вихідні параметри можна використовувати як критерії оптимізації. У нашому дослідженні ключовим вихідним параметром є інтенсивність зношування I , кг/м², який і припускаємо функцією відгуку. Вихідними ж параметрами встановлюємо (відповідно для першого та другого етапів обробки) – зусилля вдавлювання деформувального інструмента P_1, P_2 ; радіус деформувального інструмента R_1, R_2 ; подачу деформувального інструмента S_1, S_2 ; глибину азотованого шару a , тобто $I = \varphi(P_1, P_2, R_1, R_2, S_1, S_2, a)$.

Незалежними факторами, які впливають на зносостійкість і є однозначними, керованими, незалежними від інших факторів і сумісними між собою, у нашому випадку виступають: зусилля вдавлювання деформувального інструмента на I етапі обробки (P_1) – x_1 , Н; радіус деформувального інструмента на I етапі обробки (R_1) – x_2 , мм; подача деформувального інструмента на I етапі обробки (S_1) – x_3 , мм/об; зусилля вдавлювання деформувального інструмента на II етапі обробки (P_2) – x_4 , Н; радіус деформувального інструмента на II етапі обробки (R_2) – x_5 , мм; подача деформувального інструмента на II етапі обробки (S_2) – x_6 , мм/хв; товщина азотованого шару на III етапі обробки (a) – x_7 , мкм;. Значення перерахованих факторів залишаються сталими в процесі експерименту, мають вплив на залежні фактори. Вибраних факторів достатньо для опису поведінки системи.

У нашому дослідженні для отримання багатофакторних статистичних моделей \hat{y}_1 використано робастний багатофакторний план експерименту $3^4 \times$

$5^1 \times 9^1 \times 10^1 // 30$: 4 фактори на 3 рівнях, 1 фактор на 5 рівнях, 1 фактор на 9 рівнях, 1 фактор на 10 рівнях, 30 дослідів.

Досліджували характеристики якості технологічного процесу у – інтенсивність зношування поверхневого шару валу (I , кг/м^2) залежно від таких факторів, що на неї впливають:

X_1 – зусилля вдавлювання деформувального інструмента на I етапі обробки, P_1 , Н, рівні: 150, 200, 220, 250, 275, 300, 350, 400, 450, 500.

X_2 – радіус деформувального інструмента на I етапі обробки, R_1 , мм, рівні: 3; 3,5; 4.

X_3 – подача деформувального інструмента на I етапі обробки, S_1 , мм/об, рівні: 0,4; 0,5; 0,6.

X_4 – зусилля вдавлювання деформувального інструмента на II етапі обробки, P_2 , Н, рівні: 150, 200, 250, 275, 300, 350, 400, 500, 550.

X_5 – радіус деформувального інструмента на II етапі обробки, R_2 , мм, рівні: 1; 1,5; 2.

X_6 – подача деформувального інструмента на II етапі обробки, S_2 , мм/хв, рівні: 4,5; 4,7; 4,9.

X_7 – товщина азотованого шару на III етапі обробки, a , мкм, рівні: 125, 175, 200, 220, 275.

Робоча матриця дослідження комплексного технологічного процесу зміцнення циліндричних поверхонь сталевих деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами, значення рівнів факторів і результати дослідів наведені в табл. 4.1.

Робоча матриця та результати досліджень

Кодові теоретичні значення рівнів варіювання факторів				Фактори							Функція
				Натуральне позначення факторів							Натуральне позначення функції
				P_1	R_1	S_1	P_2	R_2	S_2	a	I
				Формалізоване позначення факторів та натуральні значення їхніх рівнів							Формалізоване позначення функції
F_1	F_2, F_3, F_5, F_6	F_4	F_7	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	y
0	0	0	0	150	3	0,4	150	1,5	4,5	125	Середнє значення результатів досліджень
1	1	1	1	200	3,5	0,5	200	2	4,7	175	
2	2	2	2	220	4	0,6	250	2,5	4,9	200	
3	—	3	3	250	—	—	275	—	—	220	
4	—	4	4	275	—	—	300	—	—	275	
5	—	5	—	300	—	—	350	—	—	—	
6	—	6	—	350	—	—	400	—	—	—	
7	—	7	—	400	—	—	500	—	—	—	
8	—	8	—	450	—	—	550	—	—	—	
9	—	—	—	500	—	—	—	—	—	—	
Дослід 1				300	3	0,4	200	1,5	4,7	175	0,0163
2				400	3,5	0,6	300	2	4,5	220	0,0076
3				150	4	0,5	500	2,5	4,9	175	0,0131
4				250	3	0,4	150	1,5	4,7	200	0,3992
5				500	4	0,6	300	2	4,5	175	0,0093
6				250	3,5	0,5	550	2,5	4,9	125	0,0184
7				350	3	0,6	350	2	4,5	275	0,0057
8				400	3,5	0,6	400	2	4,5	200	0,011
9				150	4	0,4	250	1,5	4,7	275	0,0063
10				275	3,5	0,5	550	2	4,5	175	0,0129
11				350	4	0,4	350	2,5	4,9	125	0,0146
12				400	3	0,6	150	1,5	4,7	200	0,0109
13				150	3,5	0,5	550	2	4,5	275	0,0092
14				250	3	0,6	300	1,5	4,5	125	0,0168
15				350	4	0,4	150	1,5	4,9	220	0,0094
16				450	3	0,5	400	2	4,5	275	0,0130
17				500	3,5	0,6	250	1,5	4,9	125	0,0179
18				200	4	0,5	150	2,5	4,7	220	0,0099
19				250	3,5	0,6	275	1,5	4,5	175	0,0103
20				350	3	0,4	550	2	4,5	200	0,0194

21	400	4	0,4	300	2	4,9	275	0,0868
22	150	3	0,6	350	2,5	4,7	125	0,0213
23	500	4	0,5	400	2,5	4,5	275	0,0086
24	350	3,5	0,4	550	2	4,9	200	0,0159
25	220	3	0,4	150	2,5	4,5	125	0,0217
26	400	4	0,5	300	1,5	4,7	175	0,0183
27	300	3,5	0,6	400	2	4,9	220	0,0074
28	150	3	0,5	250	2,5	4,5	125	0,0166
29	500	4	0,4	550	1,5	4,7	275	0,0052
30	250	3,5	0,5	200	2	4,9	220	0,0931

Побудову регресійних моделей здійснювали з використанням програмного засобу ПРІАМ (планування, регресія та аналіз моделей) [122].

По відгуку Y отримано модель:

$$Y = 0.0339 - 0.0456u_1z_6 - 0.0459x_2z_4 + 0.0281x_3z_7 + 0.0617x_2u_4 + \\ + 0.0495x_3x_4 + 0.1024u_4z_6 + 0.0473x_3z_6 + 0.0439u_1x_7 + 0.0366x_4x_5 - \\ - 0.0278z_5x_6 + 0.0234u_1z_4 + 0.0386x_5u_7 + 0.0212x_5x_6$$

де:

$$x_1 = 0.0054 \cdot (x_1 - 316.5);$$

$$z_1 = 1.7224 \cdot ((x_1^2) - 0.0444 \cdot x_1 - 0.375);$$

$$u_1 = 4.32056 \cdot ((x_1^3) - 0.1259 \cdot (x_1^2) - 0.7247 \cdot x_1 + 0.0306);$$

$$x_2 = 2 \cdot (x_2 - 3.5);$$

$$z_2 = 1.5 \cdot ((x_2^2) - 0.6667);$$

$$x_3 = 10 \cdot (x_3 - 0.5);$$

$$z_3 = 1.5 \cdot ((x_3^2) - 1.4901 \cdot 10^{-7} \cdot x_3 - 0.6667);$$

$$x_4 = 0.0047 \cdot (x_4 - 337.5);$$

$$z_4 = 1.8918 \cdot ((x_4^2) - 0.186 \cdot x_4 - 0.414);$$

$$u_4 = 4.1681 \cdot ((x_4^3) - 0.1266 \cdot (x_4^2) - 0.7695 \cdot x_4 - 0.0246);$$

$$x_5 = 1.875 \cdot (x_5 - 1.9667);$$

$$z_5 = 1.9058 \cdot ((x_5^2) - 0.083 \cdot x_5 - 0.5234);$$

$$x_6 = 4.4118 \cdot (x_6 - 4.6733);$$

$$z_6 = 1.7675 \cdot ((x_6^2) - 0.1915 \cdot x_6 - 0.5571);$$

$$x_7 = 0.013 \cdot (x_7 - 198.333);$$

$$z_7 = 2.0381 \cdot ((x_7^2) - 0.0569 \cdot x_7 - 0.4787);$$

$$u_7 = 4.1416 \cdot ((x_7^3) - 0.0432 \cdot (x_7^2) - 0.8987 \cdot x_7 - 0.0066).$$

Статистичні характеристики моделі наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Статистичні характеристики моделі Y

Параметри статистичного аналізу		Умовні позначення	Значення параметрів y_1
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності*	$s_{\text{відтв}}^2$	3,81183e-7
	Середньоквадратичне відхилення	$s_{\text{відтв}}$	6,17400e-4
	Число ступенів свободи для дисперсії відтворюваності	$f_{\text{відтв1}}$	13
		$f_{\text{відтв2}}$	16
	Експериментальне значення G -критерію	$G_{\text{експ}}$	0.0190221
	Критичне значення G -критерію	$G_{\text{крит}}$	0,0248447
Рівень значущості		α	0,05
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Дисперсія адекватності	$s_{\text{ад}}^2$	0,000344281
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	15,2295
	Критичне значення F -критерію	$F_{\text{крит}}$	1,62
	Число ступенів свободи для адекватності	$f_{\text{ад1}}$	13
		$f_{\text{ад2}}$	16
	Рівень значущості	α	0,05
	Висновок про адекватність	адекватна	
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,980778
	Число степеней свободи для коефіцієнтів моделі	$f_{k'}$	16
	Число ступенів свободи для залишкової суми квадратів	$F_{\text{зал}R}$	29
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	2,39725
	Критичне значення F -критерію	$F_{\text{крит}}$	1,62636

	Рівень значущості	α	0,05
	Критерій Бокса – Веца	γ	3
	Інформативність моделі	добра	
Число обумовленості		cond	2,16219
Середнє значення абсолютних величин відносних похибок апроксимації, %		$ \bar{e}_{\text{відн}} $	93,5823
Середнє значення абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації		$ \bar{e}_u $	0,0112845
Частка розсіювання, яку пояснює модель		Q_y	0,961925

* – Дисперсія відтворюваності обчислена із заданого відхилення.

Таблиці статистичних характеристик, мультиколінеарності та залишків (по навчальній матриці) для моделі Y наведені в додатку А (табл. 1–3).

Для судження про якість моделі з відносних відхилень по кожному спостереженню визначали середню помилку апроксимації як середню арифметичну просту:

$$A = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%$$

Точність опису отриманої моделі, згідно з даними табл. 4.2, не задовольняє вимогам до якості цієї моделі, оскільки середня похибка апроксимації становить 93,5823 % при допустимій межі значень A – не більше 8–10% (допускається 8–15%). Про хороший підбір моделі до вихідних даних свідчить похибка апроксимації, що не перевищує меж 5–7%. Це служить непрямою ознакою неоднорідності факторного простору [123; 124]. Підтверджується наявність складнощів та особливостей побудови регресійних моделей для процесів ОЗО, різання та ін. порівняно зі стандартними підходами, які відзначено в [123].

Тому за допомогою нечіткого кластерного аналізу [125] були виділені гіпотетичні однорідні області методами, які спеціально розроблені для використання з регресійним аналізом [126–128]. Нечіткий кластерний аналіз подано в табл. 4–7 додатку А.

Спроба розбиття на 3, 4, 5, 6 кластерів була невдалою: виділені кластери перетинаються.

Модель за кластером 1.

За кластером №1 по відгуку Y отримана модель:

$$Y = 0.0121 + 0.0085x_3z_5 + 0.0053x_6z_7 - 0.0021x_3 - \\ - 0.0024x_1x_5 - 0.0017z_7 - 0.0016z_2x_6 - 0.0025x_1x_2$$

де:

$$x_1 = 0.0050 \cdot (x_1 - 348.214);$$

$$z_1 = 1.9052 \cdot ((x_1^2) + 0.1514 \cdot x_1 - 0.3238);$$

$$u_1 = 4.3875 \cdot ((x_1^3) + 0.3130 \cdot (x_1^2) - 0.6560 \cdot x_1 - 0.0523);$$

$$x_2 = 1.75 \cdot (x_2 - 3.5714);$$

$$z_2 = 2.351 \cdot ((x_2^2) + 0.1528 \cdot x_2 - 0.4219);$$

$$x_3 = 10 \cdot (x_3 - 0.5);$$

$$z_3 = 1.75 \cdot ((x_3^2) - 0.0001 \cdot x_3 - 0.5714);$$

$$x_5 = 1.647 \cdot (x_5 - 2.1071);$$

$$z_5 = 1.2492 \cdot ((x_5^2) - 0.0116 \cdot x_5 - 0.211);$$

$$x_6 = 4.1177 \cdot (x_6 - 4.6571);$$

$$z_6 = 1.5943 \cdot ((x_6^2) - 0.3387 \cdot x_6 - 0.5986);$$

$$x_7 = 0.0115 \cdot (x_7 - 212.143);$$

$$z_7 = 1.7922 \cdot ((x_7^2) + 0.0697 \cdot x_7 - 0.3723);$$

$$u_7 = 5.0217 \cdot ((x_7^3) + 0.464 \cdot (x_7^2) - 0.6302 \cdot x_7 - 0.1468).$$

Статистичні характеристики моделі за кластером №1 наведено в табл.

4.3.

Статистичні характеристики моделі Y за кластером №1

Параметри статистичного аналізу		Умовні позначення	Значення параметрів y_1
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності*	$s_{\text{відтв}}^2$	5,46892e-8
	Середньоквадратичне відхилення	$s_{\text{відтв}}$	4,83677e-4
	Число ступенів свободи для дисперсії відтворюваності	$f_{\text{відтв1}}$	7
		$f_{\text{відтв2}}$	6
	Експериментальне значення G-критерію	$G_{\text{експ}}$	0.00109918
	Критичне значення G-критерію	$G_{\text{крит}}$	0,00149793
Рівень значущості		α	0,05
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Дисперсія адекватності	$s_{\text{ад}}^2$	9,09219e-7
	Експериментальне значення F-критерію	$F_{\text{експ}}$	21,5036
	Критичне значення F-критерію	$F_{\text{крит}}$	2,72666
	Число ступенів свободи для адекватності	$f_{\text{ад1}}$	7
		$f_{\text{ад2}}$	6
	Рівень значущості	α	0,05
	Висновок про адекватність	адекватна	
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,985636
	Число степеней свободи для коэффициентов модели	$f_{k'}$	7
	Число ступенів свободи для залишкової суми квадратів	$F_{\text{зал}R}$	13
	Експериментальне значення F-критерію	$F_{\text{експ}}$	4,20666
	Критичне значення F-критерію	$F_{\text{крит}}$	2,72666
	Рівень значущості	α	0,05
	Критерій Бокса – Веца	γ	2
	Інформативність моделі	добра	
Число обумовленості		cond	2,53427
Середнє значення абсолютних величин відносних похибок апроксимації, %		$ \bar{e}_{\text{ивідн}} $	5,34124

Середнє значення абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації	$ \bar{e}_u $	0,000483677
Частка розсіювання, яку пояснює модель	Q_y	0,971479

* – Дисперсія відтворюваності обчислена із заданого відхилення.

Таблиці статистичних характеристик, мультиколінеарності та залишків (по навчальній матриці) для моделі Y за кластером №1 наведено в додатку Б (табл. 8–10).

На основі отриманих результатів під час дослідження комплексної технології ОЗО побудовано графіки рис. 4.1–4.2.

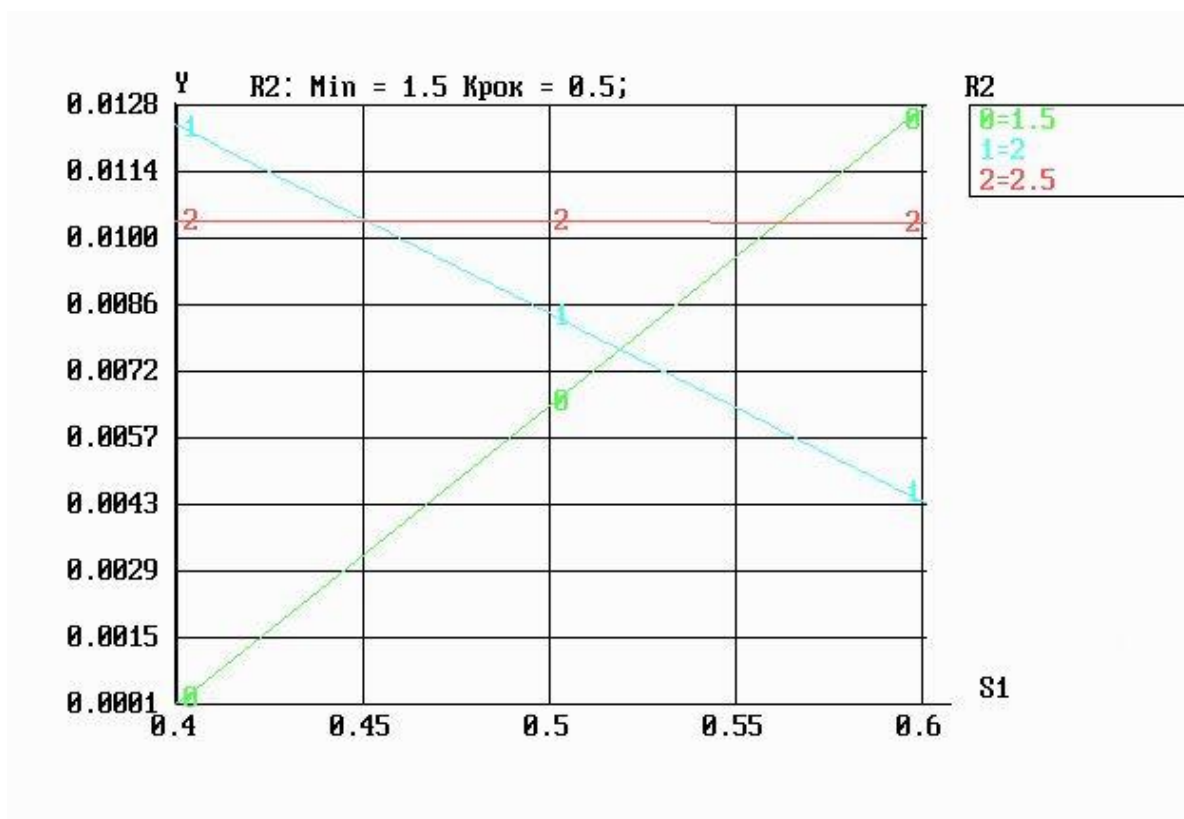


Рис. 4.1. Взаємодія радіуса деформувального елемента (R_2) та швидкості подачі (S_1) на зносостійкість деталі. Решта факторів були зафіксовані на таких рівнях: $P_1 = 150$, $R_1 = 3$, $S_2 = 4.5$, $a = 275$.

Характер залежності y від факторів S_1 і R_2 залежно від окремих параметрів у площині їх дійсних значень (рис. 4.2), при цьому решта факторів зафіксовані на таких рівнях: $P_1 = 150$, $R_1 = 3$, $S_2 = 4.5$, $a = 125$.

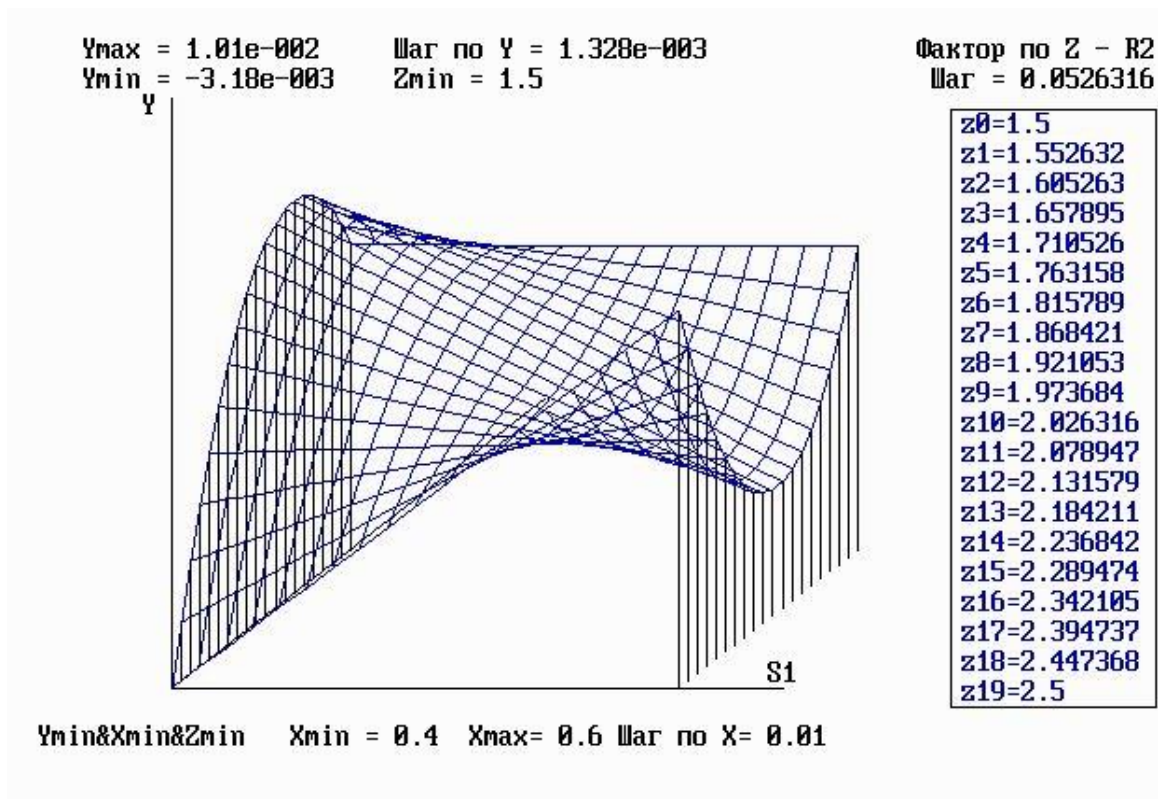


Рис. 4.2. Поверхня відгуку функції $y = f(S_1, R_2)$.

Модель за кластером 2.

За кластером № 2 по відгуку Y отримана модель:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0.0496 - 0.2088x_3 + 0.2263x_4z_6 - 0.3440x_2z_4 + 0.4256z_4u_7 - \\
 & -0.2142z_7 - 0.0880x_7 + 0.1460x_4 - 0.1023x_2x_4 + 0.0670x_3u_7 + \\
 & + 0.0881z_1 + 0.0268z_3 + 0.0160z_6.
 \end{aligned}$$

де:

$$x_1 = 0.0047 \cdot (x_1 - 288.75);$$

$$z_1 = 1.6786 \cdot ((x_1^2) - 0.1601 \cdot x_1 - 0.2442);$$

$$u_1 = 4.0085 \cdot ((x_1^3) - 0.3694 \cdot (x_1^2) - 0.4322 \cdot x_1 + 0.0511);$$

$$\begin{aligned}
x_2 &= 1.7778 \cdot (x_2 - 3.4375); \\
z_2 &= 1.6996 \cdot (x_2^2 - 0.1844 \cdot x_2 - 0.5802); \\
x_3 &= 10 \cdot (x_3 - 0.5); \\
z_3 &= 1.3333 \cdot (x_3^2 - 0.0001 \cdot x_3 - 0.75); \\
x_5 &= 1.5238 \cdot (x_5 - 1.8437); \\
z_5 &= 2.1892 \cdot (x_5^2 - 0.4137 \cdot x_5 - 0.4150); \\
x_4 &= 0.0085 \cdot (x_4 - 232.813); \\
z_4 &= 1.477 \cdot (x_4^2 - 0.0003 \cdot x_4 - 0.3227); \\
u_4 &= 4.2322 \cdot (x_4^3 - 0.3527 \cdot x_4^2 - 0.5247 \cdot x_4 + 0.1137); \\
x_6 &= 4.7059 \cdot (x_6 - 4.6875); \\
z_6 &= 2.0179 \cdot (x_6^2 - 0.0716 \cdot x_6 - 0.4948); \\
x_7 &= 0.0113 \cdot (x_7 - 186.25); \\
z_7 &= 1.7552 \cdot (x_7^2 - 0.1143 \cdot x_7 - 0.316); \\
u_7 &= 5.8572 \cdot (x_7^3 - 0.4489 \cdot x_7^2 - 0.5855 \cdot x_7 + 0.1058).
\end{aligned}$$

Статистичні характеристики моделі за кластером № 2 наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Статистичні характеристики моделі Y за кластером №2

Параметри статистичного аналізу		Умовні позначення	Значення параметрів y_1
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності*	$s_{\text{відтв}}^2$	9,08209e-7
	Середньоквадратичне відхилення	$s_{\text{відтв}}$	3,6789e-3
	Число ступенів свободи для дисперсії відтворюваності	$f_{\text{відтв1}}$	12
		$f_{\text{відтв2}}$	3
	Експериментальне значення G-критерію	$G_{\text{експ}}$	0.0110675
	Критичне значення G-критерію	$G_{\text{крит}}$	0,0214321
	Рівень значущості	α	0,05
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Дисперсія адекватності	$s_{\text{ад}}^2$	1,01193e-4
	Експериментальне значення F-критерію	$F_{\text{експ}}$	93,6471

	Критичне значення F -критерію	$F_{\text{крит}}$	7,19571
	Число ступенів свободи для адекватності	$f_{\text{ад1}}$	12
		$f_{\text{ад2}}$	3
	Рівень значущості	α	0,05
	Висновок про адекватність	адекватна	
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,998707
	Число степеней свободи для коефіцієнтів моделі	$f_{k'}$	12
	Число ступенів свободи для залишкової суми квадратів	$F_{\text{зал}R}$	15
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	8,74464
	Критичне значення F -критерію	$F_{\text{крит}}$	7,19571
	Рівень значущості	α	0,05
	Критерій Бокса – Веца	γ	3
	Інформативність моделі	добра	
Число обумовленості		cond	1,64068
Середнє значення абсолютних величин відносних похибок апроксимації, %		$ \bar{e}_{\text{відн}} $	29,1566
Середнє значення абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації		$ \bar{e}_u $	0,0036789
Частка розсіювання, яку пояснює модель		Q_y	0,997415

* – Дисперсія відтворюваності обчислена із заданого відхилення.

Таблиці статистичних характеристик, мультиколінеарності та залишків (за навчальною матрицею) для моделі Y за кластером № 2 наведено в додатку А (табл. 11–13).

Оскільки факторний простір для показника зносостійкості поверхні виявився неоднорідним, то за допомогою нечіткого кластерного аналізу його розділили на однорідні підобласті, у кожній з яких була побудована своя модель. Усі моделі є адекватними, інформативними та стійкими. Використання цих моделей дозволяє розробити оптимальний технологічний процес відповідно до обраних якісних показників.

4.2. Моделювання процесу двохетапної обробки пластичним деформуванням методом кінцевих елементів

Ресурс деталей машин і механізмів характеризується станом їх поверхневого шару, сформованого в процесі фінішних операцій технологічного процесу. Стан поверхні деталі, як правило, впливає на її експлуатаційні властивості.

Процес ОЗО супроводжується інтенсивним докладанням зусиль деформування приповерхневим шаром, унаслідок якого відбувається пружна і пластична деформація. Як результат, у поверхневому шарі виникають залишкові напруження.

Під час реалізації розробленого технологічного процесу основними факторами контактної взаємодії деформувального інструмента і заготовки, які формують характеристики якості поверхневого шару заготовки та впливають на формування напружено-деформованого стану поверхні, є зусилля вдавлювання, що виникають в зоні контакту інструмента з деталлю, а також контактне тертя між поверхнею деталі та інструментом.

Основне завдання оздоблювально-зміцнювальної обробки деталі – утворення заданого мікрорельєфу, підвищення твердості приповерхневого шару, а також утворення залишкових напружень стиснення, які позитивно впливають на зносостійкість деталі.

Для моделювання технологічного процесу обробки заданої деталі зроблено такі припущення:

а) під час скінчено-елементного аналізу деталей вважається безкінечною заготовкою;

б) деформувальний інструмент має сферичну форму, і є абсолютно твердим;

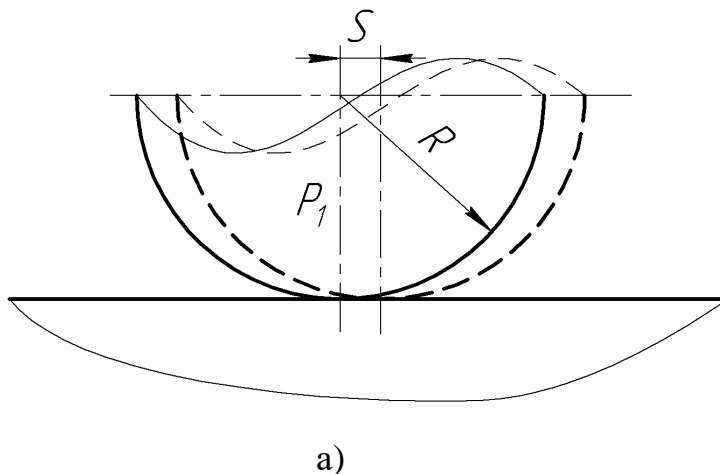
в) технологічний процес формування мікрорельєфу є динамічним, тому при його моделюванні для спрощення постановки задачі розв'язували її як квазідинамічну, тобто в статичній постановці деформувальному інструменту задавалась не швидкість, а переміщення.

Для вирішення поставленої задачі брали експериментальні зразки зі сталі.

Відомо декілька технологічних процесів для підвищення характеристик якості та експлуатаційних показників циліндричних валів у поліграфічному обладнанні. Зокрема технологічний процес описано в роботі [9]. Його суть у тому, що на першому етапі на поверхню циліндричної деталі наносять частково регулярний мікрорельєф з регулярними нерівностями, які не перетинаються, а на другому етапі металеву поверхню хромують. Основними факторами, які впливають на формування залишкових напружень, є зусилля вдавлювання деформувального елемента в зоні деформації, а також контактне тертя, яке виникає між поверхнею тертя та деформувальним елементом.

У запропонованому ж технологічному процесі на першому етапі на поверхні формують повністю регулярний мікрорельєф на всій поверхні, а на другому етапі на окремих ділянках поверхні утворюють з додатковим зусиллям деформування частково регулярний мікрорельєф. Це змінює величину та розташування залишкових напружень по всій поверхні [129].

З урахуванням вісесиметричності заготовки вирішується плоска задача у вертикальній площині, у якій розташована вісь заготовки. Це відбувається у два етапи: на першому етапі формуються відбитки від вібровиглажувальної обробки (рис. 4.3, а) з максимальною відстанню між слідами $S=0.2$ мм, на другому проводиться вигладжування вздовж осі заготовки по вже сформованому на першому етапі залишковому напружено-деформованому стану (рис. 4.3, б).



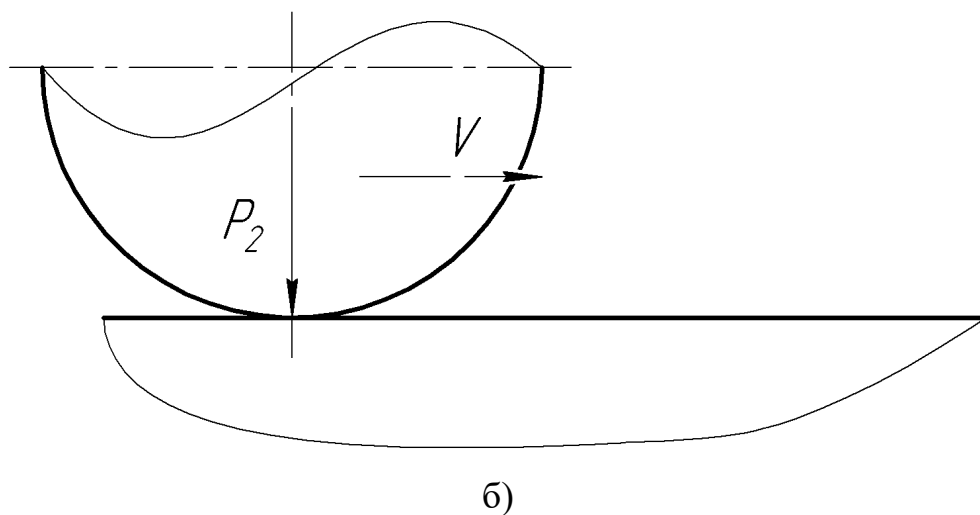
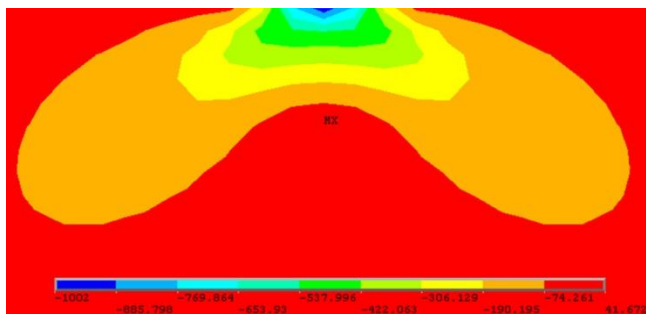
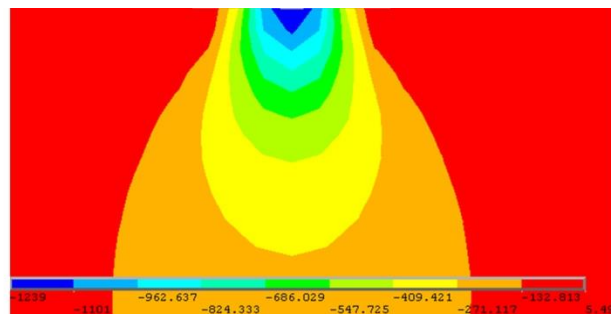


Рис. 4.3. Розрахункова схема процесу комбінованого вібровигладжування:
 а – етап 1 – формування НДС вібровигладжування з зусиллям ($P_1=100\text{Н}$),
 б – етап 2 – вигладжування в осьовому напрямку із зусиллям $P_2=150\text{Н}$.

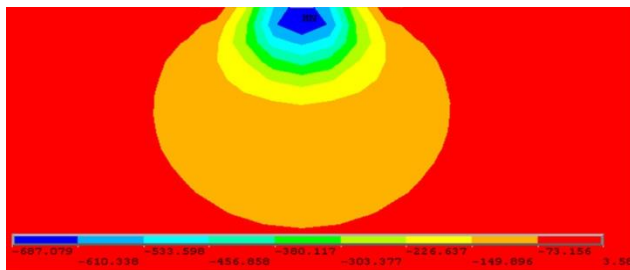
Результати напружено-деформованого стану на активній стадії при впровадженні індентора напершому етапі показані рис. 4.4.



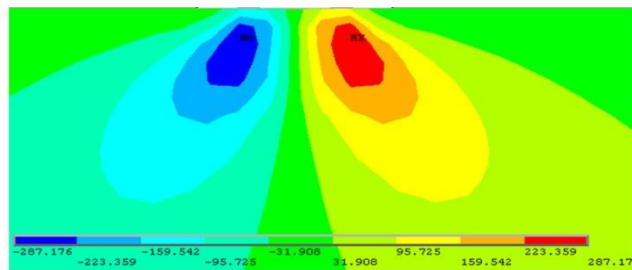
а)



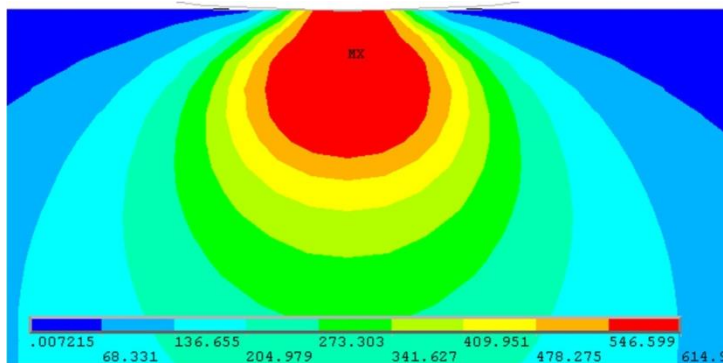
б)



в)



г)

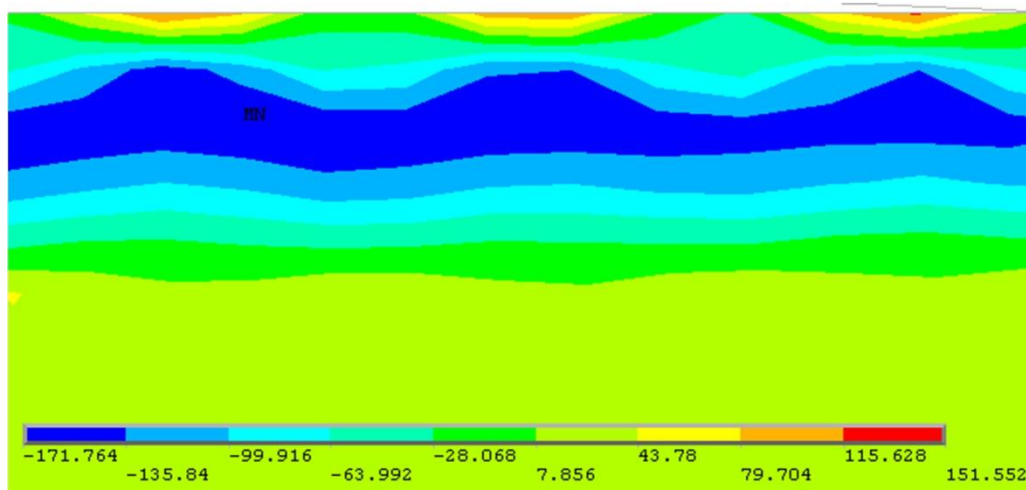


д)

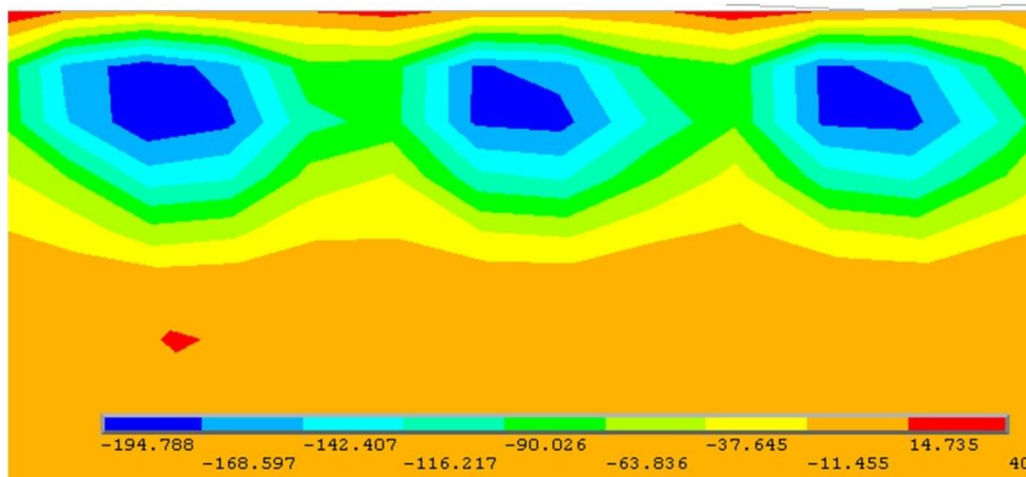
Рис. 4.4. Напружено-деформований стан поверхневого шару при впровадженні індентора на першому етапі: а), б) і в) – нормальні напруження σ_x , σ_y , σ_z , г) – дотичні напруження τ_{xy} , д) – інтенсивність напружень

Аналіз напружено-деформованого стану в осередку деформації (рис. 4.4) показує, що всі компоненти нормальних напружень σ_x , σ_y , σ_z , є стискальними, їх максимальні величини – 1000 МПа, 1239 МПа та 1000 МПа відповідно (рис. 4.4, а-в). Напруження зсуву τ_{xy} змінює знак під індентором на протилежний, а їх величина залежить від коефіцієнта тертя між деталлю та деформувальним інструментом [130].

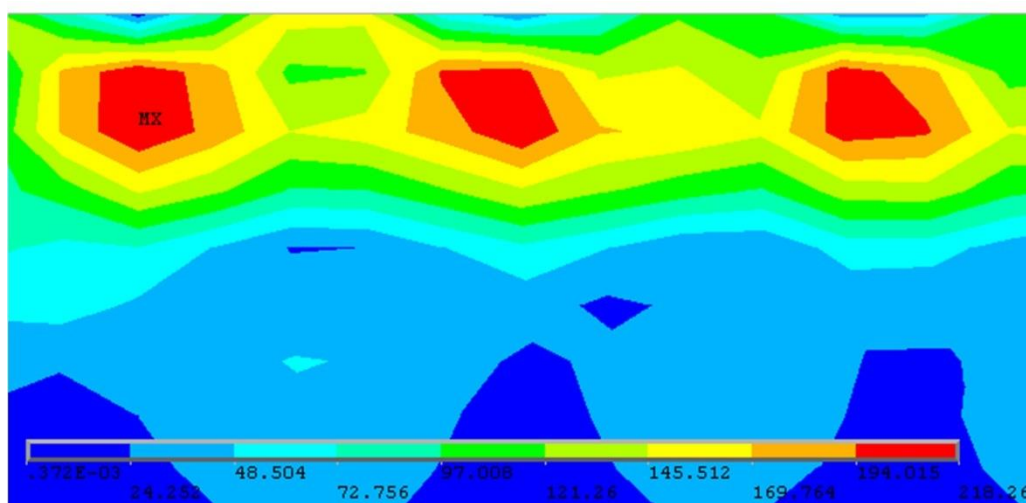
Напружено-деформований стан після першого етапу (вібровигладжування) – залишкові напруження – показано рис. 4.5.



а)



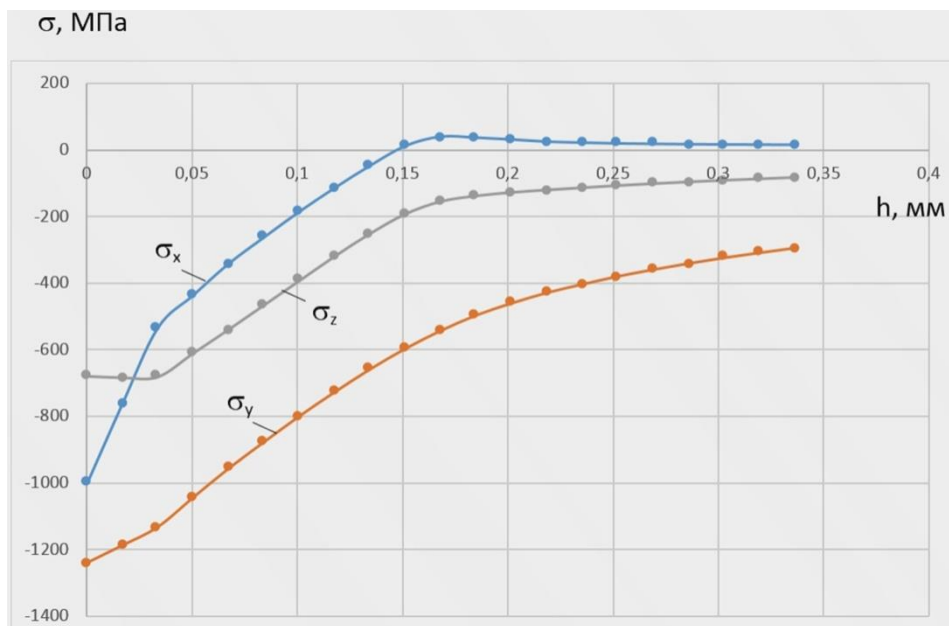
б)



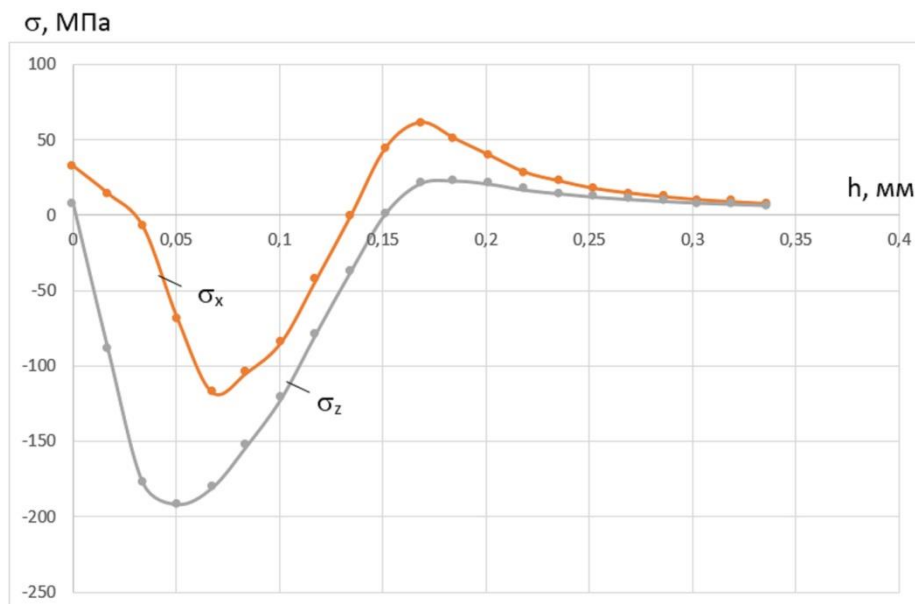
в)

Рис. 4.5. Розподіл залишкових напружень після першого етапу обробки вібровигладжуванням: а) і б) – нормальні напруження σ_x і σ_z , в) – інтенсивність напружень

У результаті вібровигладжувальної обробки в приповерхневому шарі формуються стискальні залишкові напруження σ_x і σ_z . Їх максимальна величина знаходиться під слідом від вібровигладжувального інструменту. Розподіл діючих і залишкових напружень у приповерхневому шарі на першому етапі вібровигладжувальної обробки показано на рис. 4.6.



а)

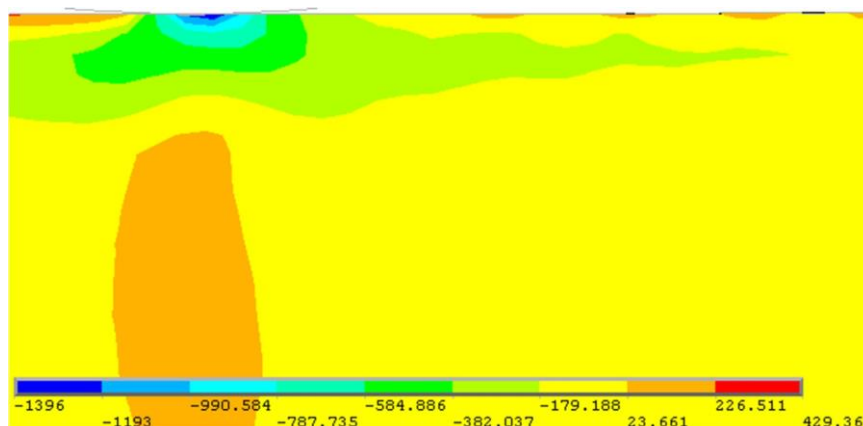


б)

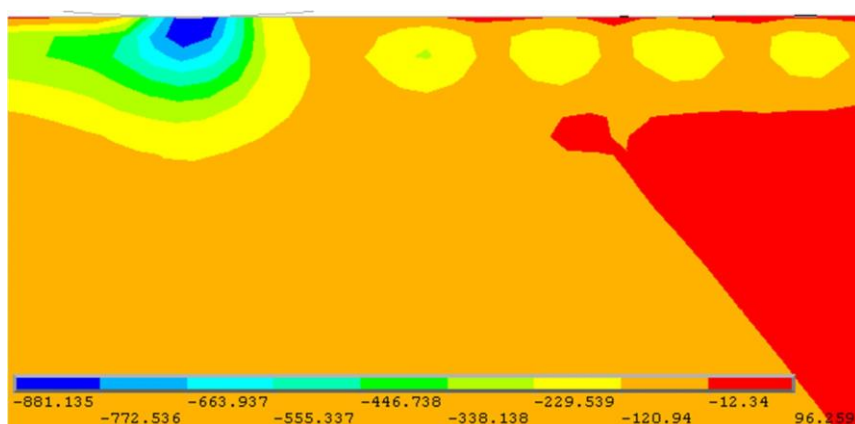
Рис. 4.6. Розподіл напружень у поверхневому шарі на першому етапі вібровигладжувальної обробки: а) – діючі напруження на активній стадії навантаження, б) – залишкові напруження

Максимальна величина залишкових напружень спостерігається на глибині 50–100 мкм та складає $\sigma_x = 117$ МПа, $\sigma_z = 191$ МПа.

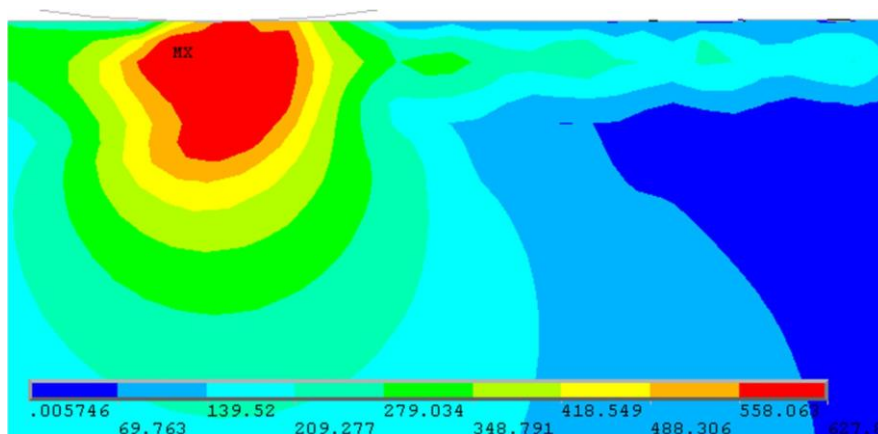
Моделювання другого етапу – вигладжування вздовж осі деталі виконувалось враховуючи напружено-деформований стан, який був сформований на першому етапі вібровигладжувальної обробки (рис. 4.7).



а)



б)



в)

Рис. 4.7. Напружено-деформований стан поверхневого шару на другому етапі вигладжувальної обробки: а) та б) – нормальні напруження σ_x , та σ_z , в) – інтенсивність напружень

Розподіл залишкових напружень після другого етапу обробки вигладжуванням наведено на рис. 4.8.

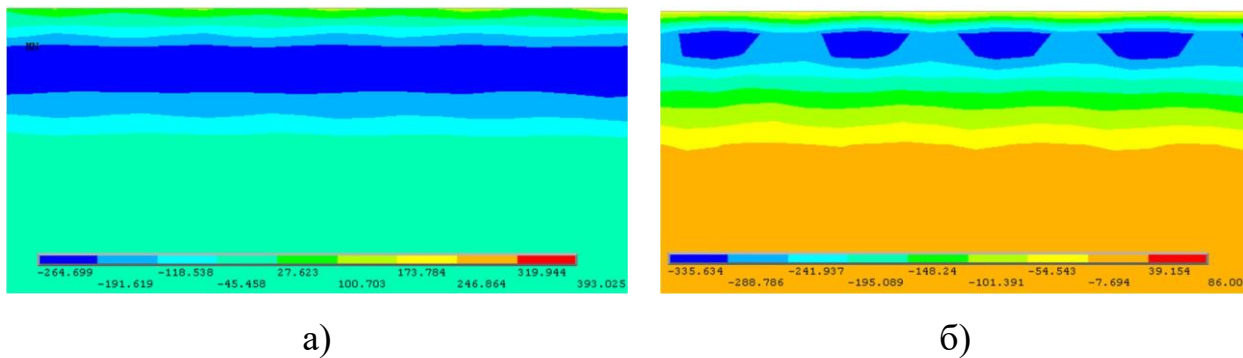


Рис. 4.8. Розподіл залишкових напружень після другого етапу обробки вигладжуванням в осьовому напрямку: а) і б) – нормальні напруження σ_x і σ_z

У приповерхневому шарі спостерігаються залишкові напруження стиску напруження σ_x і σ_z . Графіки розподілу нормальних залишкових напружень по глибині поверхневого шару h подано на рис. 4.9.

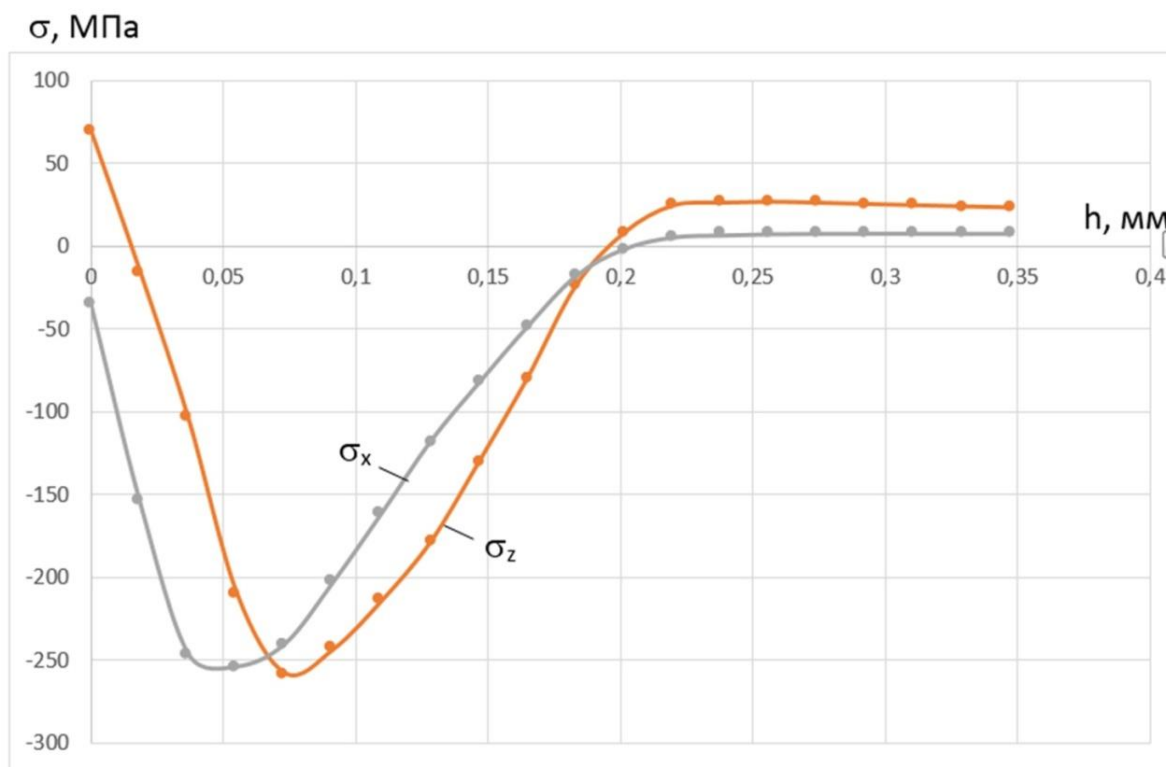


Рис. 4.9. Розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі після другого етапу вигладжувальної обробки

Після другого етапу вигладжувальної обробки спостерігається збільшення величини та глибини залягання нормального залишкового напруження σ_z за рахунок більшого зусилля вигладжування [131]. Значне збільшення нормального залишкового напруження σ_x можна пояснити збігом напрямків дії цих напружень на першому та другому етапах комбінованої обробки.

Висновки до розділу 4

1. Результати багатфакторного планування експерименту, завдяки отриманій аналітичній моделі, дозволяють прогнозовано впливати на експлуатаційні характеристики деталей поліграфічного обладнання шляхом вибору оптимальних режимів зміцнювальної обробки.

2. Розроблення математичної моделі багатфакторного планування за допомогою програми ПРИАМ дало змогу отримати залежності факторів і побудувати їх поверхні відгуків, встановити зв'язок між вхідними параметрами реалізації комплексного технологічного процесу та зносостійкістю циліндричних деталей поліграфічного обладнання.

3. Встановлено, що після першого етапу комплексного технологічного процесу в приповерхневому шарі формуються стискувальні залишкові напруги σ_x і σ_z . Їх максимальна величина знаходиться на глибині 50–100 мкм та складає $\sigma_x=100\text{--}120$ МПа, $\sigma_z=170\text{--}190$ МПа.

Після другого етапу розробленого технологічного процесу в місцях повторного проходження деформувального інструмента збільшується глибина та величина залягання нормального залишкового напруження σ_z за рахунок додаткового зусилля вигладжування. А значне збільшення нормального напруження σ_x можна обґрунтувати збігом напрямків дії цих напружень на першому та другому етапах комплексного технологічного процесу.

Підвищення параметрів якості приповерхневого шару циліндричних валів координувально-транспортного блоку дозволяє значно підвищити зносостійкість цих валів.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Забезпечити точну безперебійну роботу циліндричних деталей, які утворюють пари тертя у вузлах поліграфічного обладнання, можна завдяки оптимальному поєднанню деяких їх геометричних, фізико-механічних, структурних і технологічних властивостей. Для циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок вкрай важливими є показники якості їх поверхні, тобто сукупність таких поверхневих параметрів, при яких забезпечуються такі показники, як зносостійкість, довговічність, точність роботи вузлів. Тому основним завданням дослідження було вивчення впливу параметрів комплексного технологічного процесу зміцнювальної обробки циліндричних деталей, що утворюють пари тертя, на їх експлуатаційні характеристики та на якісну роботу координувально-транспортного блоку загалом.

Дослідження проводили на обладнанні та матеріалах, які описані в розділі 2, та згідно з поданими в ньому методиками.

5.1. Дослідження мікроструктури поверхні деталей

Для проведення експериментальних досліджень використовували ролики валів координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок і зразки зі сталі 45.

Дослідженнями встановлено, що в початковому стані зразки зі сталі 45 мають феритно-перлітну структуру із середнім розміром феритних зерен 40...60 мкм (рис. 5.1). Перлітна складова частина характеризується пластинчатою будовою з відстанню між пластинами близько 0,1...0,3 мкм.

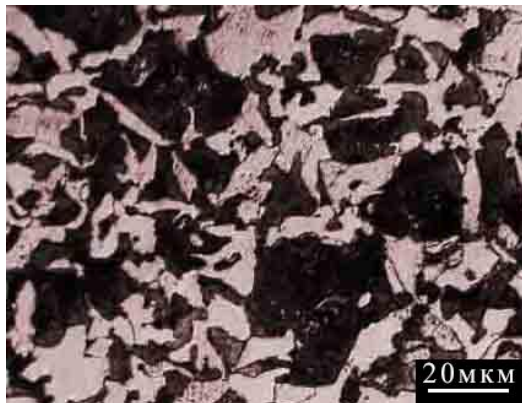


Рис. 5.1. Мікроструктура зразків зі сталі 45 у початковому стані

Після двохетапної обробки поверхні пластичним деформуванням, а саме вібраційним обкатуванням і наступним поздовжнім вигладжуванням, мікроструктура поверхневого шару являє собою деформовані зерна фериту та перліту. У результаті такої обробки отримано подрібнену структуру, у поверхневому шарі якої окремі зерна отримують невиразний характер (рис. 5.2).

Деформації розповсюджуються в глибину матеріалу, що зумовлює зміни його механічних властивостей у бік зростання за рахунок внутрішньозернового дислокаційного зміцнення. Це, у свою чергу, спричиняє підвищення твердості та міцнісних характеристик поверхневого шару металу.

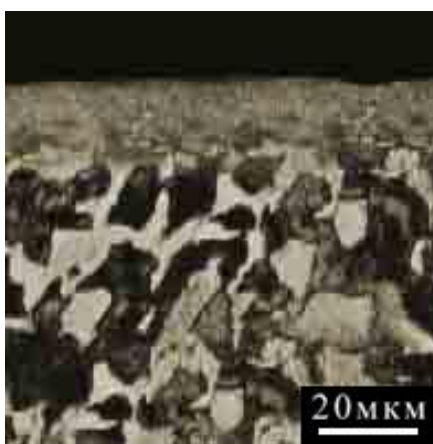


Рис. 5.2. Мікроструктура зразків зі сталі 45 після обробки ППД

У структурі металу завдяки трьохетапній комплексній обробці (рис. 5.3) формуються дрібніші зерна приповерхневого шару деталі після ППД та утворюється нітридний прошарок унаслідок іонного азотування в плазмі геліконного розряду, що обумовлює додаткове зміцнення та значне підвищення твердості поверхні.

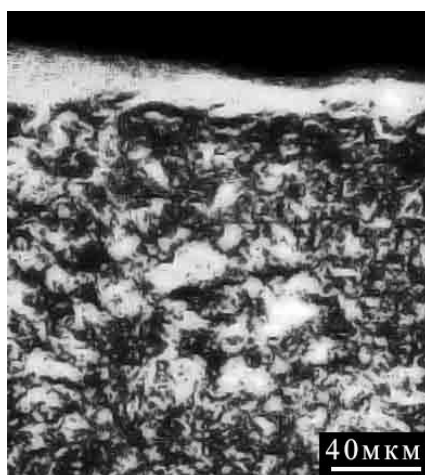


Рис. 5.3. Мікроструктура зразків зі сталі 45 після комплексної обробки (ППД + іонно-плазмове азотування)

Значну глибину азотованого шару від поверхні вглиб металу отримали на основі експериментальних досліджень режимів іонно-плазмове азотування та вибору з-поміж них оптимальних. Результати досліджень наведено нижче.

5.2. Вплив режимів обробки поверхнево-пластичним деформуванням на геометричні параметри мікрорельєфу поверхні

Із-за неможливості шляхом виключно теоретичних досліджень прогнозувати вплив запропонованої комплексної технології зміцнення на якість поверхні та на її експлуатаційні властивості, було проведено ряд однофакторних експериментів.

Як показали попередні дослідження, третій етап комплексної обробки, а саме іонне азотування в плазмі геліконного розряду, не

впливає на геометричні параметри мікрорельєфу поверхні, оскільки тут має місце тільки дифузійна модифікація приповерхневого шару, яка спричиняє підвищення його твердості. Тому проводити дослідження геометричних параметрів мікрорельєфу поверхні окремо після третього етапу обробки є недоцільним.

Дослідження впливу режимів обробки поверхневим пластичним деформуванням і параметрів деформувального інструмента на геометричні характеристики поверхневого шару проводили для зразків зі сталі 45 та сталі 20Х після вібраційного накатування на першому етапі комплексної обробки, а також після другого етапу – алмазного вигладжування. Методику проведення таких досліджень описано в розділі 2.

Як показали попередні дослідження, з-поміж параметрів технологічної обробки шляхом ППД таких, як зусилля вдавлення інструмента (P), радіус деформувального інструмента (R), величина подачі деформувального інструмента (S), кількість подвійних ходів інструмента ($n_{\text{подв.х.}}$), кількість обертів шпинделя ($n_{\text{шп.}}$) тощо, найбільший вплив на геометричні параметри поверхні мають перші два.

На першому етапі проводили зміцнювальну обробку вібронакатуванням циліндричних деталей ($D=65$ мм) зі сталей 45 (HRC 44...46) і 20Х (HRC 60...62). За параметрів обробки $R=3-4$ мм, $P=150-500$ Н, $e=0,2-1,0$ мм, $n_{\text{подв.х.}}=1000-2000$ подв.х./хв, $S=0,08-12,5$ мм/об., $n_{\text{шп.}}=25-2000$ об/хв отримано повністю регулярний мікрорельєф гексагонального типу що, згідно з ГОСТ 24773-81 належить до класу – з елементами ввігнутої форми; групи – новий мікрорельєф; виду – сітчастий, типу – шестикутний; форми – ввігнута. Така вибірка обумовлена аналізом досліджень П. О. Киричка, В. Г. Олійника, О. І. Лотоцької, О. І. Хмілярчук та ін. [34; 132–135].

Проведені дослідження для визначення впливу режимів технологічного процесу утворення мікрорельєфу гексагонального типу ввігнутої форми на його геометричні параметри є аналогічними дослідженням, які проведені для ЧРМР синусоїдального типу та ПРМР [7; 80; 135; 136].

На другому етапі проводили зміцнювальну обробку деталей (з уже нанесеним на першому етапі на їх поверхню ПРМР). Обробку здійснювали згідно з описаною в розд. 2 методикою на тому самому обладнанні алмазним вигладжуванням шляхом нанесення ЧРМР нестандартизованого виду у вигляді поздовжніх заглиблень ввігнутої форми. Ці заглиблення розташовані паралельно до осі обертання циліндричної деталі на відстані одне від одного яка не менша, ніж подвійне значення ширини заглиблення (розд. 3, рис. 3.12).

Залежність глибини нерівностей мікрорельєфу (h), їх ширини (b) і висоти напливів (h_n) при значеннях радіуса деформувального елемента в діапазоні 1,5...2,5 мм та і зусиллі вдавлювання $P=150\text{--}550$ Н для досліджуваних сталей має чіткий лінійний характер (рис. 5.4, 5.5, 5.6).

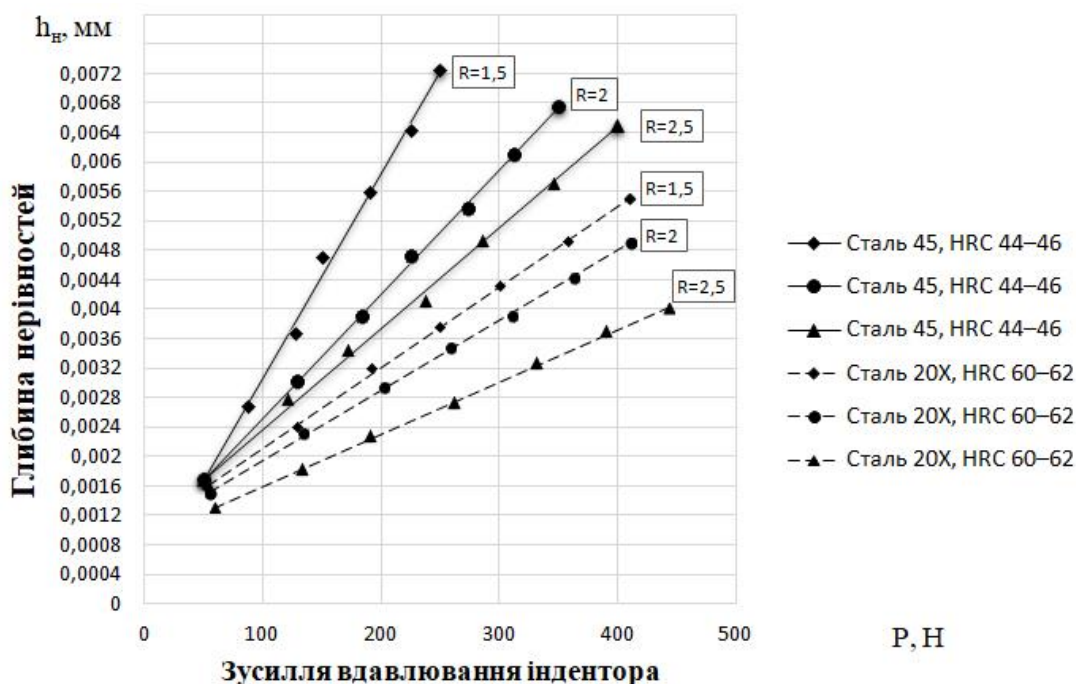


Рис. 5.4. Залежність глибини нерівностей мікрорельєфу від зусилля вдавлювання за різних радіусів сфери індентора

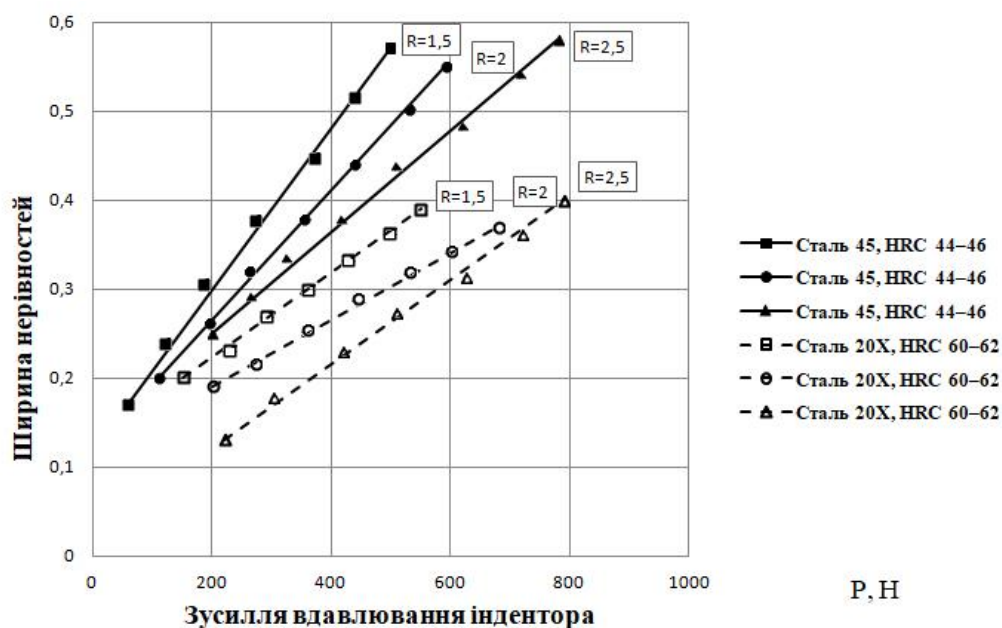


Рис. 5.5. Залежність ширини нерівностей мікрорельєфу від зусилля вдавлювання за різних радіусів сфери індентора

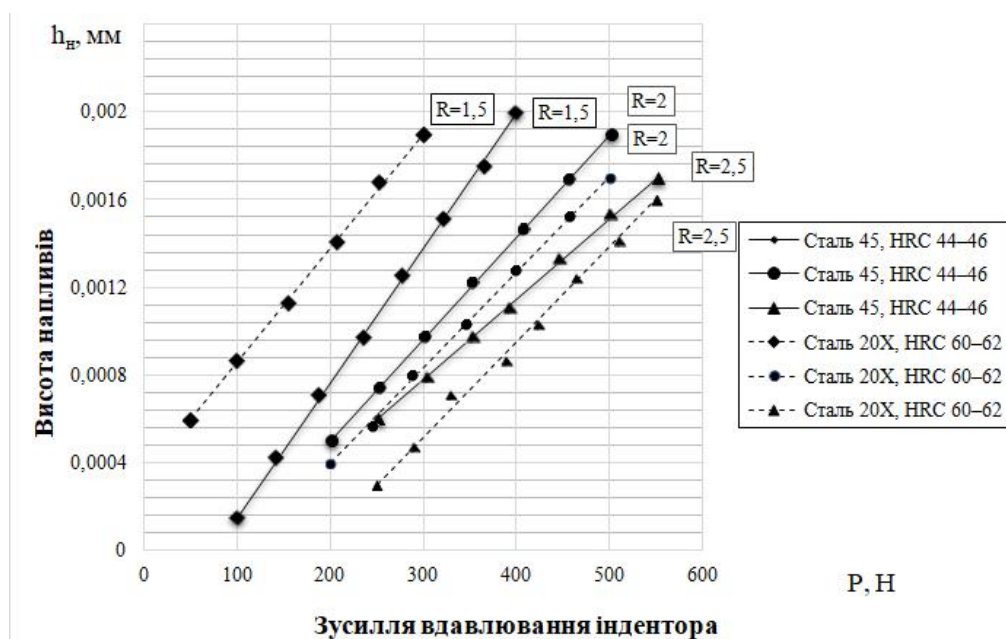


Рис. 5.6. Залежність висоти напливів мікрорельєфу від зусилля вдавлювання за різних радіусів сфери індентора

Як видно з рис. 5.4–5.6 початкова твердість поверхневого шару також має неабиякий вплив на залежність геометричних параметрів нерівностей від технологічних факторів. На рисунках можна побачити, що за одних і тих же значень зусиль і радіусів деформувального елемента, розміри нерівностей на

зразках зі сталі 45 більші ніж зі сталі 20Х. Це можна пояснити різницею твердості поверхонь матеріалів.

Методом досліджень встановлено оптимальні параметри режимів обробки зразків зі сталі 45 на перших двох етапах. Вібратійне обкатування на першому етапі обробки та алмазне вигладжування на другому етапі проводили в режимах, наведених у табл. 5.1 та 5.2 [1; 12; 137; 138].

Таблиця 5.1

Оптимальні режими для нанесення ПРМР вібраційним обкатуванням на першому етапі комплексної зміцнювальної обробки

Матеріал	Зусилля вдавлення інструмента P , Н	Радіус деформувального інструмента R , мм	Кількість подвійних ходів інструмента $n_{подв.х.}$, $хв^{-1}$	Подача деформувального інструмента S , мм/об	Кількість обертів шпинделя $n_{шп.}$, об/хв
Сталь 45, HRC 44–46	325	3,5	1300	0,5	125
Сталь 20Х, HRC 60–62	450	2,0	1300	0,5	125

Оптимальні режими для нанесення ЧРМР алмазним вигладжуванням на
другому етапі комплексної зміцнювальної обробки

Матеріал	Зусилля вдавлення інструмента P , Н	Радіус деформувального інструмента R , мм	Кількість подвійних ходів інструмента $n_{подв.х.}$, XB^{-1}	Подача деформувального інструмента S , мм/хв	Кількість обертів шпинделя $n_{шп.}$, об/хв
Сталь 45, HRC 44–46	350	2	0	4,7	0
Сталь 20X, HRC 60–62	500	1,0	0	4,7	0

5.3. Експериментальні дослідження шорсткості поверхні

Шорсткість поверхні є одним з найважливіших показників якості поверхні. Вона стандартизована згідно з ДСТУ ISO 4287:2012 «Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури» [139].

Дослідження шорсткості поверхні проводили за методикою, описаною в розділі 2, на зразках зі сталей 45 та 20X після точіння, вібраційної обробки та на зразку зі сталі 45 після комплексного технологічного процесу за такими параметрами як R_a (середнє арифметичне відхилення профілю) та R_z (висота нерівностей профілю по 10 точках у межах базової довжини).

На рис. 5.7–5.10 подано профілограми шорсткості поверхонь сталей 45 та 20X без обробки та після вібраційної обробки, а також обробки сталі 45, що передбачає застосування трьохетапної комплексної технології зміцнення.

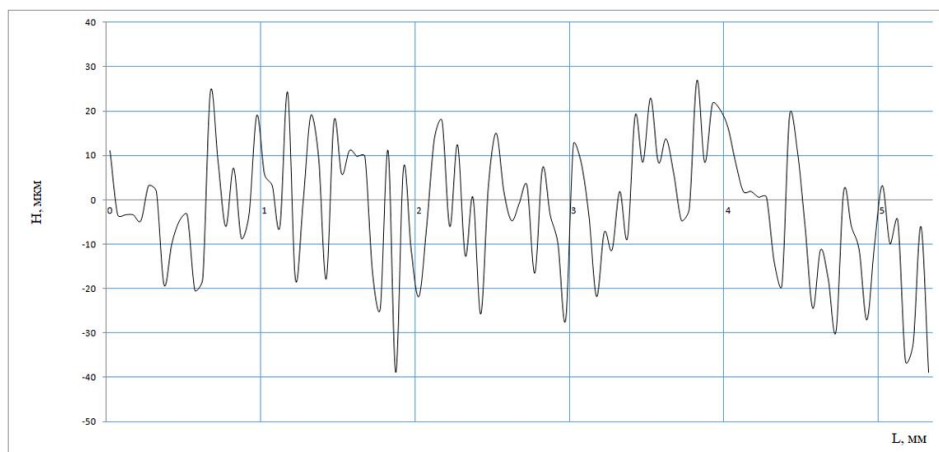


Рис. 5.7. Профілограма поверхні валу зі сталі 45 без зміцнювальної обробки

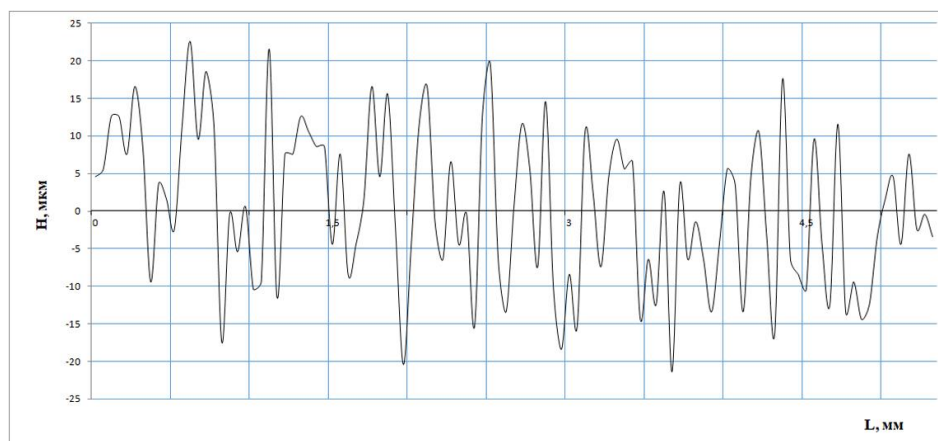


Рис. 5.8. Профілограма поверхні валу зі сталі 20Х без зміцнювальної обробки

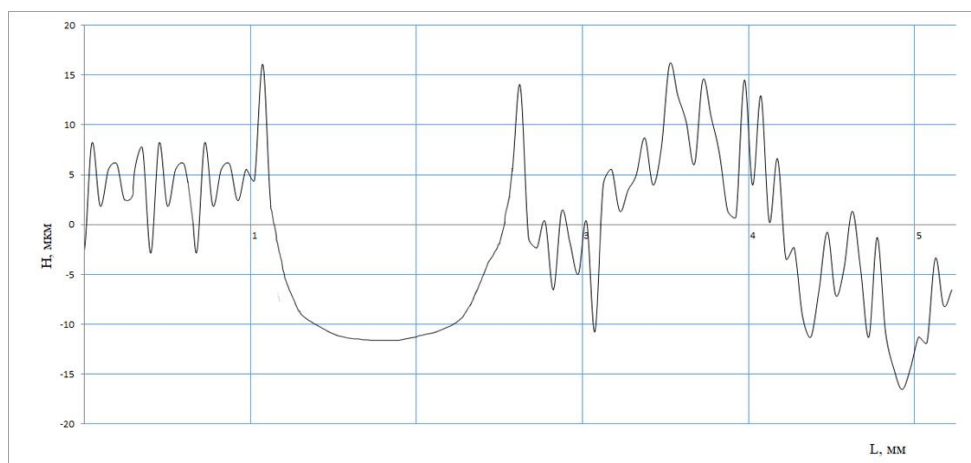


Рис. 5.9. Профілограма поверхні валу зі сталі 45 після вібраційного обкатування (етап 1) та поздовжнього алмазного вигладжування (етап 2)

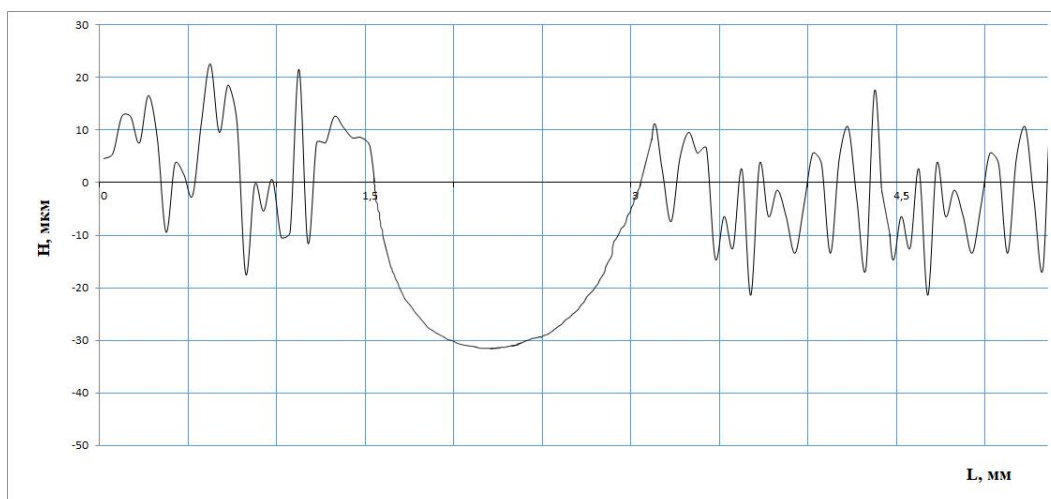


Рис. 5.10. Профілограма поверхні валу зі сталі 20Х після вібраційного обкатування та поздовжнього алмазного вигладжування

Параметри шорсткості поверхні до обробки, на проміжній стадії обробки та після завершення комплексного технологічного процесу наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Середнє арифметичне відхилення профілю та висота нерівностей профілю по 10 точках для сталі 45 за різних умов обробки

Метод поверхневої обробки	Середнє арифметичне відхилення профілю, R_a , мкм	Висота нерівностей профілю по 10 точках, R_z , мкм
Сталь 45		
Зразок після обробки точінням	5,8	18,2
Зразок після обробки ППД	2,7	8,4
Зразок після комплексної ОЗО	без змін	без змін

Сталь 20Х		
Зразок після обробки точінням	4,3	17,6
Зразок після обробки ППД	3,5	10,5

Під час досліджень зміцнювальної обробки поверхневим пластичним деформуванням величину зусилля вдавлювання інструмента змінювали в діапазоні від 150 *H* до 550 *H*, а ряд значень радіуса деформувального інструмента становив: 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 мм.

Дослідження показали, що параметри шорсткості поверхні після іонного азотування в плазмі геліконного розряду (завершальний етап комплексної технології зміцнення) практично не відрізнялись від параметрів шорсткості поверхні після обробки пластичним деформуванням (початкові два етапи).

5.4. Дослідження режимів іонного азотування в плазмі геліконного розряду

Експериментальні дослідження азотування в геліконному розряді проводили на підкладках із середньовуглецевої сталі 45, оскільки з цього матеріалу виготовлені вали та ролики координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок і цей матеріал має широке застосування завдяки невеликій вартості прокату.

Азотування здійснювали в іонно-плазмовій вакуумно-технологічній установці, яка містить геліконне джерело плазми (робоча частота – 13,56 МГц) з багатовитковою пласкою антеною, розташованою за торцевим діелектричним вікном, та окремими розрядною і дрейфовою камерами (рис. 5.11) [140–145].

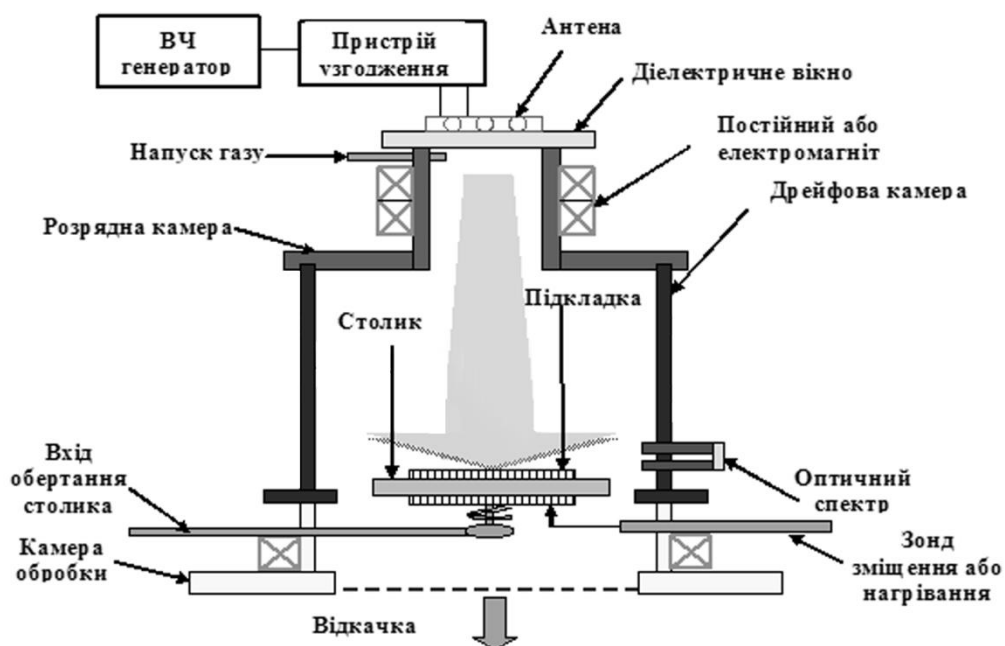


Рис. 5.11. Схематичне зображення конструкції іонно-плазмової вакуумно-технологічної установки з геліконним джерелом плазми та розділеними розрядною і дрейфовою камерами.

У конструкції геліконного джерела з плоскою антеною для збудження розряду використовується планарна антена, розташована зовні діелектричного вікна, що замикає з торця металеву або діелектричну розрядну камеру. При цьому ВЧ потужність вводиться вздовж магнітного поля. У нашій конструкції вперше було застосовано технологічну дрейфову камеру та показано можливість проведення технологічних процесів з плазмою великої густини за межами геліконного реактора. Докладно конструктивні особливості, технічні характеристики та дослідження характеристик геліконної плазми, що продукується в іонно-плазмовій вакуумно-технологічній установці, викладено в розділі 2 та в роботах [140–145].

Технологічний процес іонного азотування сталі 45 в геліконній плазмі іонно-плазмової вакуумно-технологічної установки здійснювали у два етапи [63]:

- 1) попереднє очищення зразка (геліконною плазмою в середовищі аргону);
- 2) безпосередньо процес азотування в геліконній плазмі.

Попереднє очищення поверхонь кожного зразка виконували в такий спосіб:

- проводили попереднє відкачування робочої камери вакуумно-технологічної установки до значення залишкового тиску порядку 10^{-4} мм. рт. ст.;
- проводили напуск робочого газу (аргону) в робочу камеру та виконували операції очищення.

Операцію очищення підкладки виконували за таких технологічних параметрів установки:

- тиск робочого газу (аргону) – $7 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.;
- величина потужності ВЧ генератора, завдяки якій здійснювали геліконний розряд у режимі «Колона», – $P = 600$ Вт;
- потенціал робочого столика – $U = -50$ В;
- тривалість процесу очищення – 5 хв.

Сам процес азотування поверхонь зразків розпочинали після закінчення операції їх очищення та без вилучення зразків з робочої камери. Після очищення робочий газ аргон з робочої камери відкачували та напускали робочий газ азот (або суміш азоту та аргону), в атмосфері якого реалізовувався режим «Колона» геліконного розряду. Тривалість процесу азотування становила 30 хв.

Перед азотуванням зразка, який пройшов перших 2 етапи обробки поверхневим пластичним деформуванням, для визначення оптимальних параметрів азотування проводили ряд дослідів на п'яти зразках зі сталі 45, які не проходили попередню обробку. Розміри зразків, які піддавали азотуванню в геліконній плазмі іонно-плазмової вакуумно-технологічної установки, були $20(L) \times 10 \times 3(H)$ мм.

Параметри процесу азотування в геліконній плазмі зразків наведено в табл. 5.4.

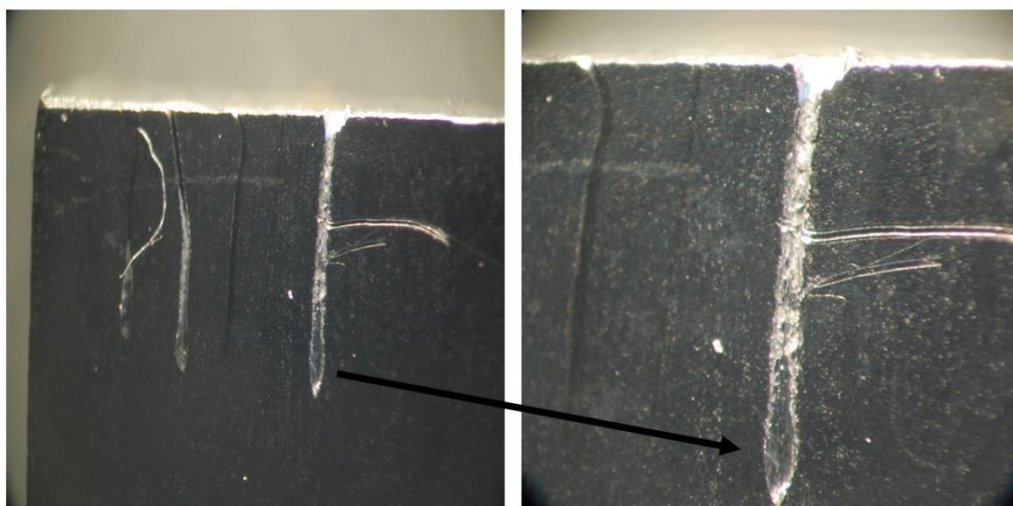
Таблиця 5.4

Параметри режимів азотування для зразків зі сталі 45

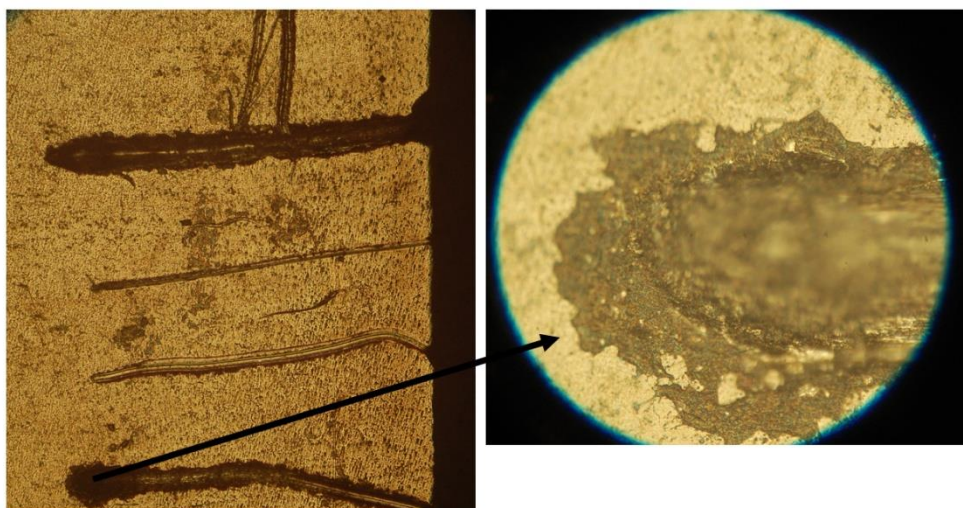
№ досліду (зразка)	Потужність генератора, Вт	Тиск газу (азот/суміш), мм.рт.ст.	Потенціал столика, В	Температура підкладки, °С
1	600	$7 \cdot 10^{-3}$	-50	330
2	600	$7 \cdot 10^{-3}$	“плаваючий”	330
3	600	$7 \cdot 10^{-3}$	-197	330
4	600	$7 \cdot 10^{-3}$, суміш (аргон 30 %, азот 70 %)	-50	330
5	600	$5-7 \cdot 10^{-3}$, суміш (аргон 30 %, азот 70 %)	“плаваючий”	330

5.5. Дослідження твердості

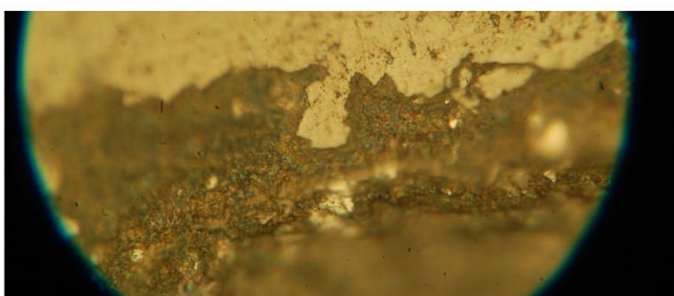
Вимірювання мікротвердості поверхневого шару після азотування на перших чотирьох зразках (рис.5.12–5.14) показало незначне збільшення мікротвердості по глибині проникнення (рис.5.15). Також на поверхні цих зразків було виявлено утворення неконтрольованої поверхневої плівки, яка блокувала проходження іонів азоту вглиб підкладки (рис. 5.12 б, в, г). Природа утворення цієї плівки, як показали подальші дослідження методом хімічного аналізу, являла собою оксидну плівку. На зразку 5, поверхню якого піддавали більш ретельній очистці (подвійна промивка камери інертними газами), після азотування спостерігалось значне підвищення мікротвердості на певну глибину за рахунок насичення поверхні іонами азоту та утворення нітридних шарів.



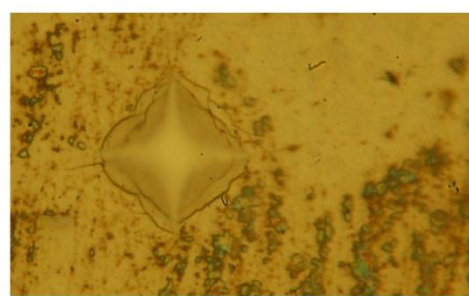
а



б



в



г

Рис. 5.12. Азотована сторона зразка: а – біологічний мікроскоп; б–г – металографічний мікроскоп

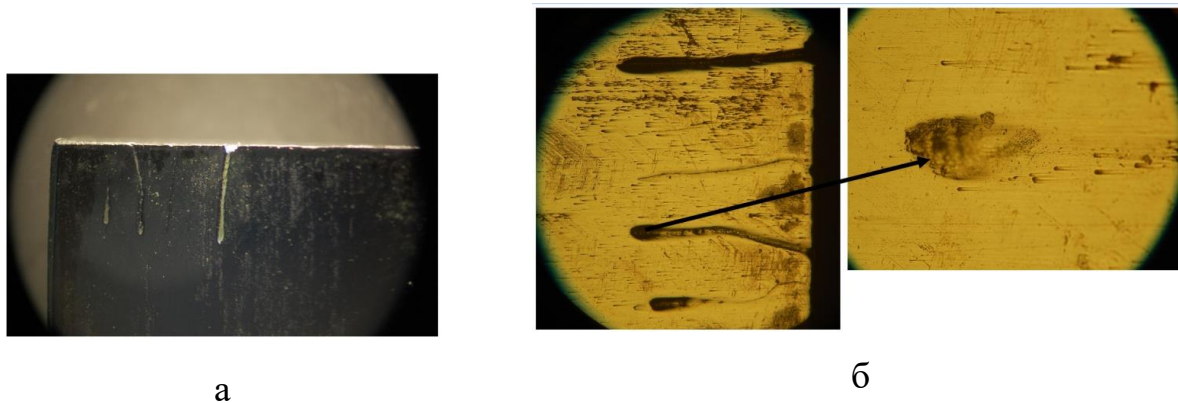


Рис. 5.13. Азотована сторона зразка після полірування: а – біологічний мікроскоп, б – металографічний мікроскоп

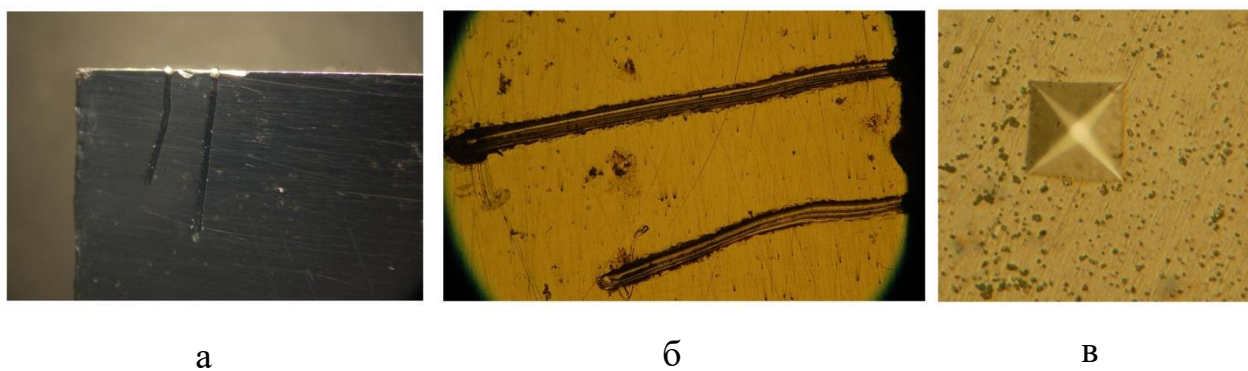


Рис. 5.14. Зворотня, не азотована сторона зразка: а – біологічний мікроскоп; б, в – металографічний мікроскоп

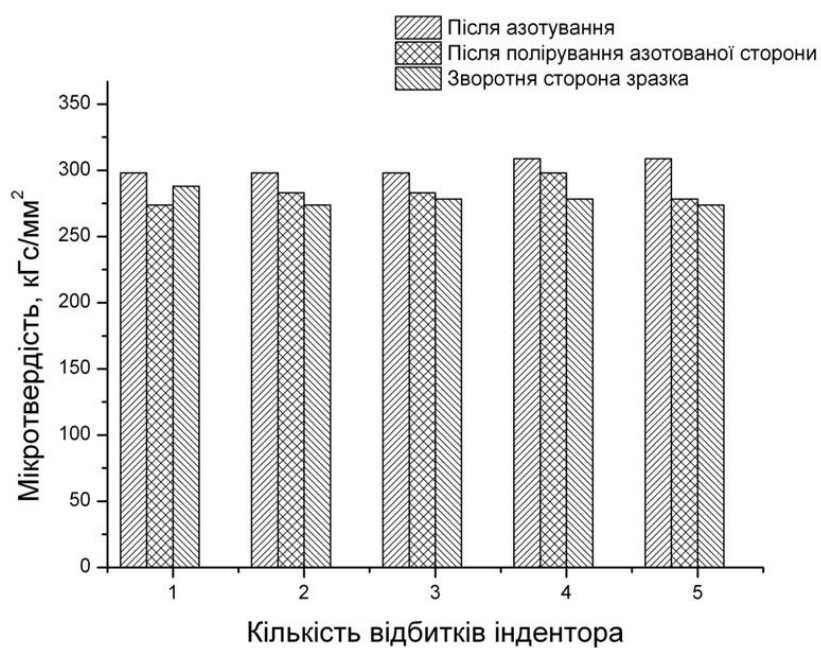


Рис. 5.15. Усереднені значення мікротвердості зразків 1–4

Схеми розташування відбитків пірамідки мікротвердометра при вимірюванні мікротвердості [146; 147] азотованого шару та вимірювання мікротвердості подано на рис. 5.16–5.19. Взаємне розташування первинного (нормального) та тангенціального (бокового) потоків іонів азоту показано на рис. 5.19 (а). Бокові грані зразків були захищені від тангенціального потоку іонів азоту на відміну від інших граней, які були закриті металевими екранами.

У цьому дослідженні основним критерієм формування властивостей азотованого в геліконному розряді шару є мікротвердість, оскільки вона дає можливість локально, по глибині, визначити вплив розподілення та взаємодію дифундувальних атомів азоту з атомами заліза як основи середньовуглецевої сталі. Змінюючи умови азотування: напругу на підкладці (енергію іонів азоту), тиск газу (густину іонного струму), температуру підкладки, час, можна регулювати властивості та будову насиченого азотом шару, підбираючи оптимальні параметри процесу. Для підвищення локальності вимірювання мікротвердості по глибині азотованого шару та виключення взаємного впливу деформованого від пірамідки металу на сусідні відбитки, їх наносили за схемою, наведеною на рис. 5.16. Навантаження на пірамідку вибирали з міркувань максимальної точності вимірювання діагоналі відбитку та мінімальної відстані від поверхні та відбитків між собою.

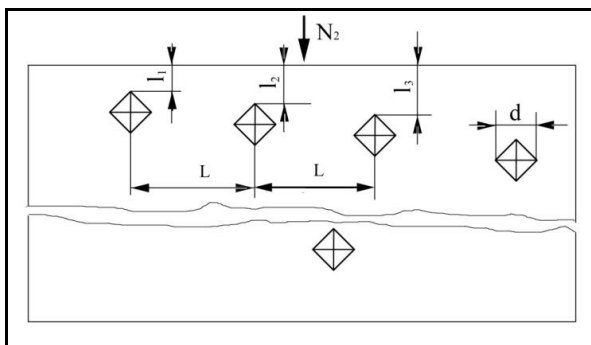
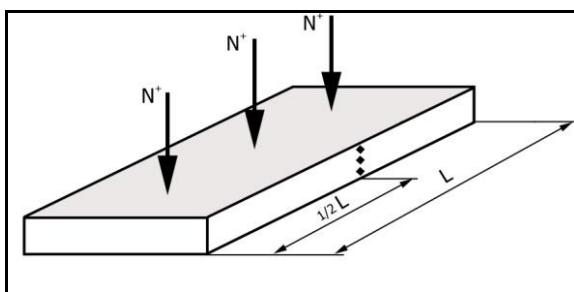
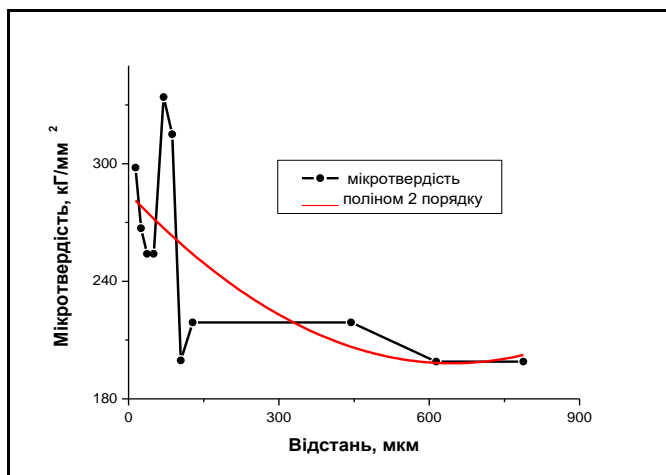


Рис. 5.16. Схема розташування відбитків пірамідки мікротвердометра при вимірюванні мікротвердості азотованого шару

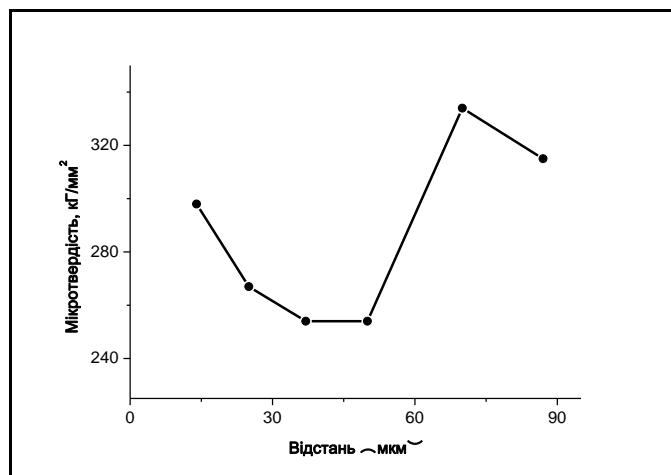
На рис. 5.17–5.19 подано результати вимірювання мікротвердості азотованих шарів з урахуванням нормального та тангенціального падіння іонів азоту. Для підвищення надійності отриманих результатів вимірювання проводили у двох точках, розташованих близько одна від одної і в напрямках, позначених зображеннями відбитків. Така схема вимірювання мікротвердості дозволяє враховувати можливі відмінності, спричинені різною ефективністю азотування в розряді в напрямках відносно поверхонь, орієнтованих нормально та тангенціально до напрямку падіння іонів азоту.



а

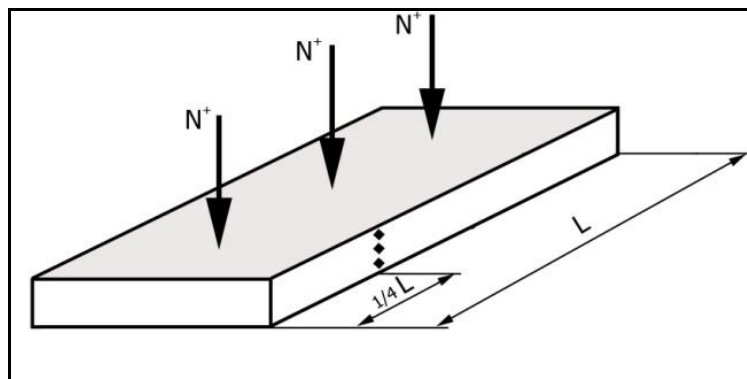


б

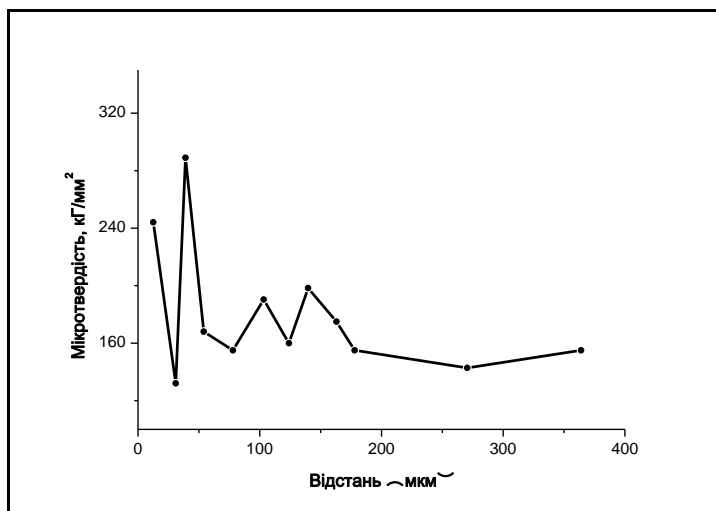


в

Рис. 5.17. Схема 1 вимірювання мікротвердості по глибині азотованого зразка сталі 45 (а) і залежність розподілення мікротвердості по глибині азотованого шару (б, в)

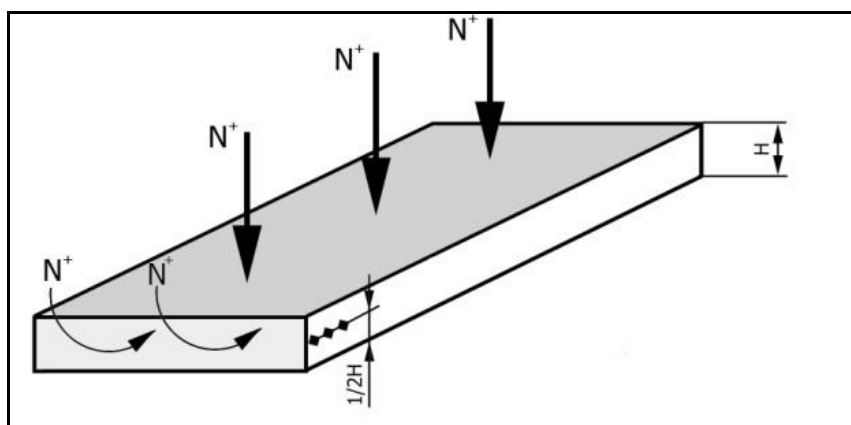


а

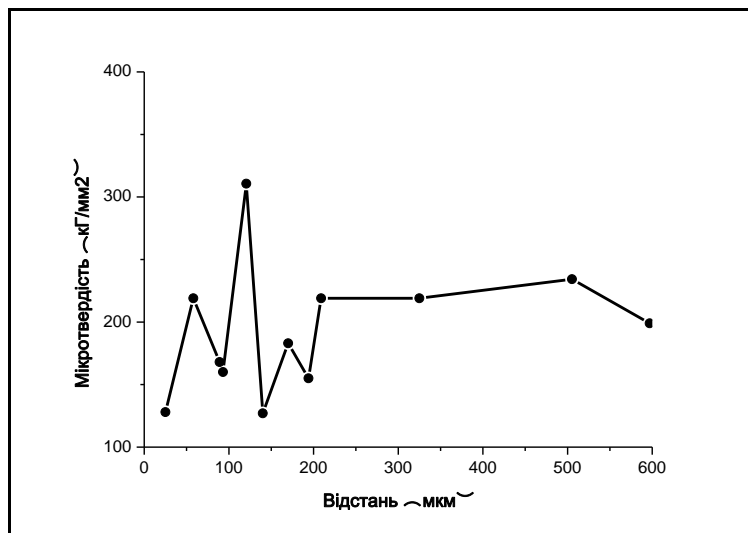


б

Рис. 5.18. Схема 2 вимірювання мікротвердості по глибині азотованого зразка сталі 45 (а) і залежність розподілення мікротвердості по глибині азотованого шару (б)



а



б

Рис. 5.19. Схема 3 вимірювання мікротвердості по глибині азотованого зразка сталі 45 (а) і залежність розподілення мікротвердості по глибині азотованого шару (б)

На рис. 5.17 схема 1, б подано екстраполяцію кривої мікротвердості поліномом другого порядку. Таке усереднення значень мікротвердості по глибині дозволяє гіпотетично прогнозувати вигляд кривої зносостійкості при терті ковзання, оскільки зносостійкість, також, є адитивною величиною і являє собою суму взаємодій між поверхнями контр-тіла та зразка в точках реального контакту.

На основі ряду попередніх досліджень були встановлені оптимальні технологічні параметри азотування сталі 45 в геліконній плазмі – режим 5 (табл. 5.4) і подальші дослідження здійснювали у цьому режимі.

Наступний етап досліджень проводили на зразку, який пройшов перші 2 етапи обробки (вібраційне обкатування та позовжнє алмазне вигладжування). Отримані результати інноваційного методу іонного-плазмового азотування в геліконному розряді порівнювали з результатами найпоширенішого нині методу – азотування в тліючому розряді.

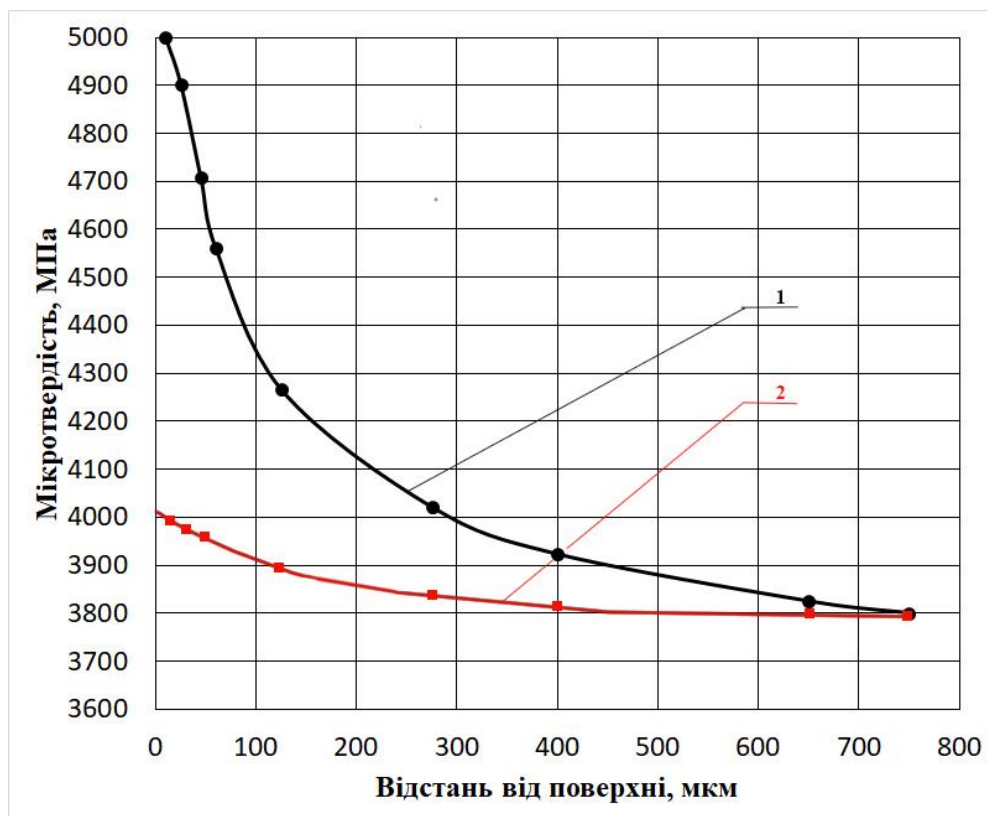


Рис. 5.20. Розподіл твердості по глибині поверхні зразка 5: 1) після комплексної ОЗО, 2) після перших двох етапів обробки ППД

Для порівняння результатів дослідження іонного азотування в геліконному та тліючому розрядах на рис. 5.21 наведено залежності розподілу твердості по глибині азотованого шару залежно від режимів іонного азотування в тліючому розряді [94].

У процесі дослідження режимів азотування в тліючому розряді змінювалися такі параметри: склад насичувального середовища від 29 до 71 % вмісту аргону, тиск у вакуумній камері в межах 55 ... 225 Па. Тривалість і температуру азотування залишали без змін – 240 хв і 570°C [94].

При азотуванні в геліконному розряді змінювали склад насичувального середовища (для зразків 1–3 подавався чистий азот, а для зразків 4–5 – суміш азоту з аргоном у співвідношенні 70 до 30) і тиск у вакуумній камері (для зразків 1–4 становив 0,933254 Па, а для зразка 5 – у межах 0,66661...0,933254 Па). Для кожного дослідження також змінювали потенціал столика (див. табл. 5.4). Тривалість азотування, температуру та потужність генератора залишали незмінними – 30 хв., 330°C та 600 Вт відповідно.

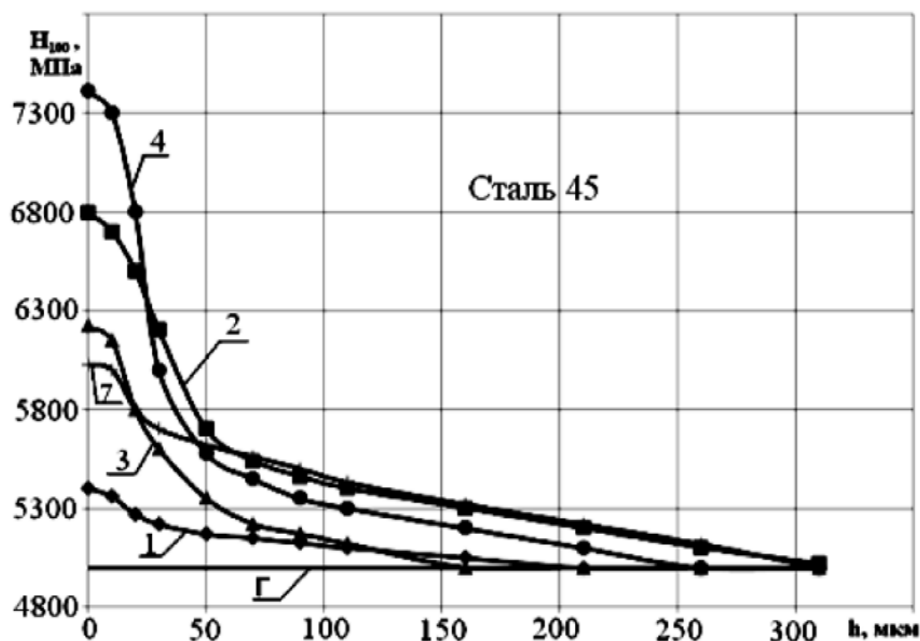


Рис. 5.21. Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару залежно від режимів іонного азотування в тліючому розряді [94].

Г – загартована сталь; 1–7 – режими азотування [94]

Вихідна твердість зразків для досліджень відрізняється, оскільки для зміцнення в геліконному розряді використовували сталь 45 у стані поставки, що піддавалася обробці поверхневим пластичним деформуванням, а азотування в тліючому розряді проводили на зразках, які перед випробуваннями пройшли різну термічну та хіміко-термічну обробку: гартування, іонне азотування та нітрогартування (іонне азотування за оптимальним режимом з подальшим гартуванням). Але, незважаючи на це, з рис. 5.20–5.21 видно, що при азотуванні в тліючому розряді твердість поверхні різко знижується (більше ніж на 50 %), починаючи з глибини 30 мкм, а до 300 мкм плавно наближається до вихідних значень. У випадку з азотуванням у геліконному розряді зменшення твердості по глибині відбувається плавно, зниження твердості на 50 % спостерігається, починаючи лише з глибини 120 мкм.

Проведене дослідження показує доцільність і перспективність застосування в якості завершального етапу комплексної технології запропонованого способу зміцнення поверхонь сталевих деталей тертя, оскільки метод іонного азотування у високочастотному геліконному розряді значно енергоощадливіший, екологічно безпечніший порівняно з іншими традиційними методами азотування та дозволяє скоротити тривалість технологічного процесу азотування в 10 разів і більше (наприклад, середня тривалість технологічного процесу іонного азотування в тліючому розряді становить 6–8 годин), при цьому мікротвердість поверхні зростає на більше ніж 30%.

5.6. Дослідження зносостійкості поверхні циліндричних деталей поліграфічного обладнання

Експериментальні дослідження на зносостійкість притискних роликів координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок обумовлені постійно зростаючими вимогами до якості та термінів виготовлення кінцевої продукції, оскільки її якісні характеристики напряму залежать від точності та безперебійності подачі вихідного матеріалу у фальцювально-склеювальний блок, де в подальшому формується обкладинка. Зношення поверхневого шару досліджуваних деталей призводить до проковзування та перекосів матеріалу, що подається і, як наслідок, фальцювання та нанесення клеєвого шару відбувається в не чітко передбачених для цього зонах, у результаті чого неточність отриманої геометричної форми обкладинки вкрай негативно впливає як на якість самої обкладинки, так і на кінцеву поліграфічну продукцію в цілому.

Дослідження проводили за методикою та режимами, викладеними в розд. 2.

Залежність інтенсивності зношення для притискних роликів координувально-транспортного блоку в початковому стані та за різних умов зміцнювальної обробки представлено на рис. 5.22.

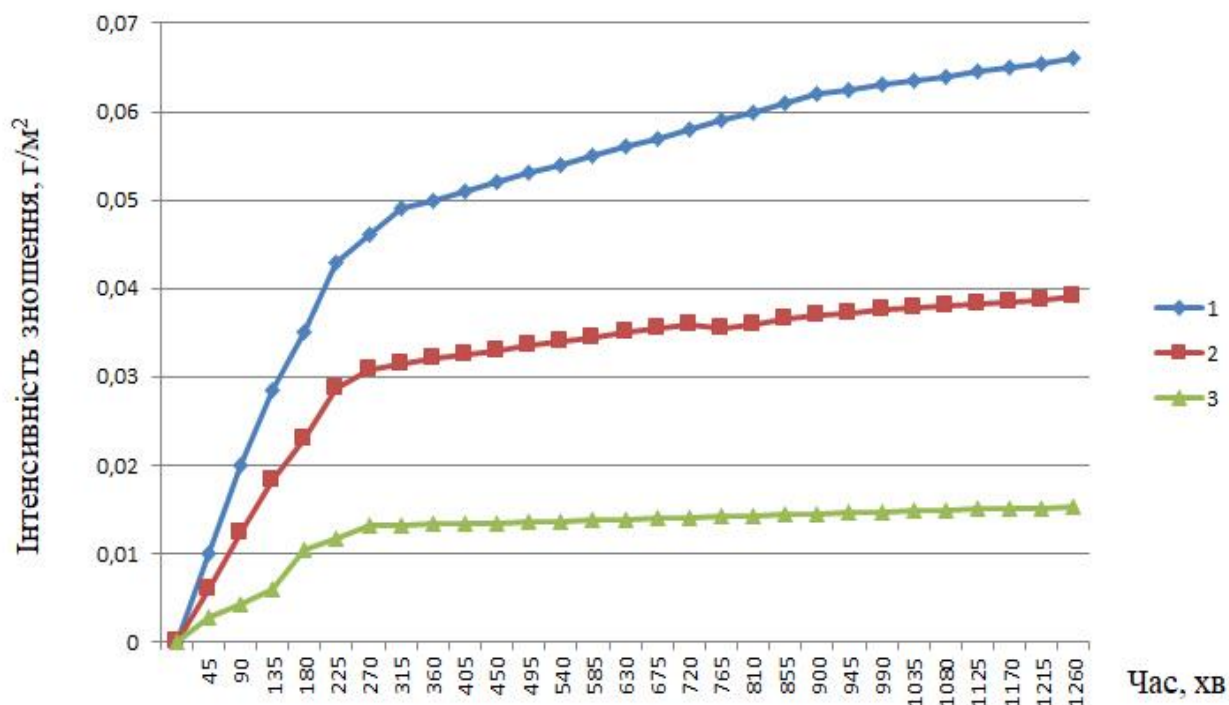


Рис. 5.23. Інтенсивність зношення залежно від часу випробування зразків зі сталі 45: 1 – у початковому стані (після чистового точіння), 2 – після вібраційного обкатування та поздовжнього вигладжування, 3 – після комплексного трьохетапного технологічного процесу зміцнення

Як видно з наведених вище залежностей (рис. 5.22), після часу припрацювання, який в середньому становить біля 250 хв, спостерігається стабільна інтенсивність зношення і, чим вище значення мікротвердості поверхневого шару, тим вона менша [148]. Це пояснюється специфічними умовами роботи деталей: відсутністю ударних навантажень при контактуванні сталевих поверхонь [149–151]. Тому підвищена мікротвердість поверхні та приповерхневих шарів циліндричних деталей координувально-транспортного блоку є ключовим показником їх високої зносостійкості [152], що відповідає правилам обирання матеріалів пари тертя.

Аналіз результатів проведених досліджень показав, що комплексний технологічний процес ОЗО забезпечує підвищення зносостійкості деталей зі

сталі 45 у більше ніж 4 рази порівняно з початковим станом (чистовим точінням) й у 2,5 рази порівняно з обробкою ППД. Тобто поверхні з найбільшою мікротвердістю мають найвищі значення зносостійкості.

5.7. Дослідження тиражної стабільності обкладинок

Процес виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапаними відбувається суцільним швидкісним потоком прямолінійного переміщення заготовок між секціями фальцювально-склеювальної лінії. Оскільки інтегральні обкладинки як книжкові оправи є завершеними напівфабрикатами, які надалі приєднуються до книжкового блоку, технологічними нормативами передбачені жорсткі допуски їх відхилення від контурної прямокутної геометрії (табл. 5.5) [4].

Таблиця 5.5

Розмірні допуски відхилення геометрії книжкових оправ
і паралельності кантів

№	Перелік ознак розмірних відхилень	Розмірні допуски відхилення		
		Якісний показник 1-ої групи (мм)	Якісний показник 2-ої групи (мм)	Якісний показник 3-ої групи (мм)
1	Паралельність відхилення зовнішніх контурів книжкової оправи (на 100 мм довжини)	0,4–0,5	0,3–0,4	0,2–0,3
2	Косина відхилення книжкового блоку, приєданого до оправи (на 100 мм довжини)	0,8–1,0	0,6–0,8	0,4–0,5

Враховуючи мінімальні відхилення (зазначені в табл. 5.5) контурних розмірів книжкових оправ після фальцювання та приклеювання країв і клапанів, завершена інтегральна обкладинка з широкими клапанами повинна відповідати таким умовам. Ширина обкладинки у верхній і нижній частинах має бути однаковою, так само повинна бути ідентичною довжина обкладинки в лівій і правій частинах, а всі кутові розміри обкладинки мають дорівнювати 90° .

Недотримання перелічених умов на розмірні відхилення, зазначені в табл. 5.5, після з'єднання книжкового блоку з обкладинкою спричинить утворення кантів з відхиленнями. Відхилення переведуть виготовлену книгу в позицію виробу з технологічними дефектами, що має бути відсортованим і вилученим із тиражу [4].

Композитна структура обкладинки (з приєднаними через клейовий шар краями та клапанами) до входження в координувально-транспортувальний блок для подальшого ущільнення перебуває в нестабільному стані, схильному до легкої втрати прямокутної геометрії зовнішнього контуру. Тому, для забезпечення якісного виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами, визначальними є вали та ролики координувально-транспортувального блоку. За допомогою цих деталей здійснюється обертове пресування склеєних частин обкладинок, з одночасним їх координатним транспортуванням уздовж центральної осі фальцювально-склеювальної лінії.

Під час налаштування лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широкими клапанами здійснювали вимірювання геометричних параметрів обкладинок із залученням мікрометричних засобів. Окрім того, до початку запуску тиражу, було виготовлено шаблон обкладинки, у контурних розмірах якого враховані допустимі відхилення для виготовлених обкладинок, а саме – паралельність відхилення зовнішніх контурів від прямокутної побудови (на 100 мм) не перевищує 0,2–0,5 мм.

У процесі технологічного тиражного виготовлення візуальний контроль застосовували до всієї продукції, оскільки на виході готові обкладинки формують горизонтальний стос, у якому чітко видно відхилення від прямокутної побудови одиничних обкладинок. Для вибіркового вимірювання шаблоном кількість зразків визначається розміром накладу (наклад – вибірка):

500 прим. – 5 прим.,

1000 прим. – 10 прим.,

5000 прим. – 30 прим.,

10000 прим. – 50 прим.,

100000 прим. – 100 прим.

Дослідження паралельності відхилення зовнішніх контурів готової обкладинки від прямокутної побудови здійснювали до та після впровадження комплексного технологічного процесу ОЗО для накладів: 500, 1000, 5000 та 10000 прим. Відсоток відбракування до комплексної обробки становив, відповідно: 4,5 %, 3,25 %, 3,2 % і 4,5 %. Після комплексної обробки відсоток відбракування зменшився до значень: 3,95...3,97 %, 2,85...2,87 %, 2,82...2,85 % та 2,77...2,79 %, відповідно до накладу.

Висновки до розділу 5

1. Дослідження мікроструктури сталевих зразків деталей координувально-транспортного блоку після перших двох етапів комплексної ОЗО засвідчило підвищення міцнісних характеристик поверхневого шару металу та збільшення його твердості за рахунок внутрішньозернового дислокаційного зміцнення, яке обумовлене деформаціями, що розповсюджуються в глибину матеріалу. Структура металу після трьохетапної комплексної обробки показує формування більш дрібних зерен приповерхневого шару деталі після ППД та утворення нітридного прошарку після іонного азотування в плазмі геліконного розряду,

що обумовлює додаткове зміцнення та значне підвищення твердості поверхні.

2. Дослідження впливу режимів обробки ППД на геометричні параметри мікрорельєфу показало чітку лінійну залежність глибини, ширини нерівностей та висоти напливів від величини радіуса деформувального інструмента та зусилля вдавлювання.

3. Виявлено відсутність впливу на геометричні параметри мікрорельєфу поверхневої модифікації шляхом іонного азотування в плазмі геліконного розряду. За рахунок утворення нітридів у приповерхневих шарах, підвищується їх твердість без зміни мікрогеометрії поверхні.

4. Дослідження параметра шорсткості поверхні R_a (середнє арифметичне відхилення профілю) засвідчило зменшення його значення вдвічі після ОЗО на перших двох її етапах. Після третього завершального етапу ОЗО значення середнього арифметичного відхилення профілю залишилось без суттєвих змін.

5. Дослідження впливу режимів іонного азотування в плазмі геліконного розряду на розподіл твердості вглиб поверхні показало, що зменшення твердості по глибині відбувається плавно, зниження твердості на 50 % спостерігається, починаючи лише з глибини 120 мкм. Доцільність і перспективність застосування методу іонного азотування у високочастотному геліконному розряді в якості завершального етапу комплексної ОЗО обумовлена його екологічною безпечністю та вдесятеро разів меншою тривалістю технологічного процесу, порівняно з іншими традиційними методами азотування, при зростанні мікротвердості поверхні на більше ніж 30%.

6. Дослідження зносостійкості поверхні циліндричних деталей координувально-транспортного блоку поліграфічного обладнання показують, що при комплексному технологічному процесі ОЗО зносостійкість деталей зі сталі 45 підвищується в більше ніж 4 рази порівняно з початковим станом (чистовим точінням) і в 2,5 рази порівняно

з обробкою ППД. Виявлено, що поверхні з вищими значеннями мікротвердості більш стійкі до зношування.

7. Визначено вплив комплексної технології на якісні параметри готових обкладинок. Встановлено що після її впровадження відсоток відбракування кінцевої продукції значно зменшився (в залежності від накладу). Наприклад, для накладу в 10000 примірників відсоток відбракування знизився на 1,72 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу – виявлено взаємозв'язки між параметрами розробленого комплексного технологічного процесу ОЗО циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок та їх характеристиками якості з урахуванням витратних матеріалів, що дозволяє на основі запропонованої узагальненої логічної схеми в параметричному вигляді прогнозувати якість й експлуатаційні властивості деталей координувально-транспортного блоку, а також контурну стабільність обкладинок.

2. Установлено аналітичну залежність між режимами обробки (геометричними параметрами елементів мікрорельєфу та радіуса сфери деформувального елемента) і відносною опорною площею поверхні. Це дозволяє шляхом регулювання параметрів режимів обробки отримати оптимальну контактну площу робочих поверхонь деталей, які контактують із заготовками обкладинок.

3. Розроблено узагальнений алгоритм керування комплексним технологічним процесом ОЗО циліндричних деталей поліграфічного обладнання, який дозволить на кожному етапі обробки досягати необхідної якості поверхонь деталей та їх експлуатаційних характеристик.

4. На основі теоретико-експериментальних досліджень режимів комплексного технологічного процесу ОЗО отримано математичні моделі, які описують рівняннями регресії, за рахунок керованих факторів: радіусів деформувального інструмента, зусиль вдавлювання, величини подачі на перших двох етапах ОЗО і товщини азотованого шару. Отримані моделі дозволяють визначити інтенсивність зношування циліндричних деталей координувально-транспортного блоку лінії для виготовлення інтегральних обкладинок.

5. У результаті числового моделювання перших двох етапів комплексної ОЗО, установлено, що максимальна величина напружень

і деформацій спостерігається в момент контактування деформувального інструмента з деталлю. При віддаленні від місця контакту величини напружень і деформацій зменшуються, наближаючись до нуля. Застосування такої моделі для процесів ОЗО дозволяє визначити величину цих напружень і прогнозувати підвищення зносостійкості деталей координувально-транспортного блоку.

6. Шляхом дослідження мікроструктури сталевих зразків встановлено підвищення міцнісних характеристик поверхневого шару металу та збільшення його твердості за рахунок внутрішньозернового дислокаційного зміцнення, яке зумовлене деформаціями, що розповсюджуються в глибину матеріалу після перших двох етапів комплексної ОЗО. Також після третього етапу комплексної обробки виявлено значне підвищення твердості поверхні та градієнтний розподіл твердості у приповерхневих шарах, яке спричинене утворенням у них нітридного прошарку, унаслідок чого відбувається додаткове зміцнення деталей.

7. Експериментальними дослідженнями впливу режимів ОЗО на геометричні параметри мікрорельєфу встановлено чітку лінійну залежність глибини, ширини нерівностей і висоти напливів від величини радіуса деформувального інструмента й зусилля вдавлювання.

8. Дослідження шорсткості поверхні після обробки ППД показало зменшення у 2 рази значення середнього арифметичного відхилення профілю, після третього етапу цей показник залишився без суттєвих змін.

9. Дослідження режимів іонного азотування в плазмі геліконного розряду показало, що розподіл твердості по глибині відбувається плавно. Лише з глибини 120 мкм спостерігається зниження твердості на 50 %, а на глибині понад 600 мкм вона прямує до значення твердості осердя металу. При зростанні мікротвердості поверхні на більш ніж 30% тривалість технологічного процесу, порівняно з іншими традиційними методами азотування, менша у понад 10 разів.

10. Дослідження зносостійкості показали при комплексному трьохетапному технологічному процесі ОЗО підвищення зносостійкості

деталей зі сталі 45 в більш, ніж 4 рази порівняно з початковим станом (чистовим точінням) і в 2,5 рази порівняно з обробкою ППД. Виявлено, що покриття з більшою мікротвердістю мають більші значення зносостійкості.

11. Визначено вплив комплексної технології на якісні параметри готових обкладинок. Установлено що після її впровадження відсоток відбракування кінцевої продукції значно зменшився (залежно від накладу). Так, для накладів: 500, 1000, 5000 та 10000 шт, відсоток відбракування до комплексної обробки становив, відповідно: 4,5 %, 3,25 %, 3,2 % та 4,5 %. Після комплексної обробки відсоток відбракування зменшився до значень: 3,95...3,97 %, 2,85...2,87 %, 2,82...2,85 % та 2,77...2,79 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гавриш А. П., Киричок П. О., Підберезний М. П. Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів. Київ : Наук. думка, 1995. 174 с.
2. Ляшенко Б. А., Клименко С. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине. *Сучасне машинобудування*. 1999. № 1(1). С. 94–104.
3. Мартинюк М. С., Якуцевич С. Я. Розроблення конструкцій книжкових оправ. *Наукові записки*. Львів : УАД. 2003. №6. С. 65–67.
4. Paliukh O., Kyrychok P., Trishchuk R., Korobka M., Dziadyk Ye. Defining technological features in the manufacture of semi-hard book covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 4/1 (106), 80–90.
5. Палюх О. О. Експериментальне визначення технологічних особливостей виготовлення напівжорстких книжково-журнальних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*. Київ : НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». 2018. Вип. 2(60). С. 22–32.
6. Рыжов Э. В., Суслов А. Г. Повышение контактной жесткости деталей вибронакатыванием. *Станки и инструменты*. 1978. № 1. С. 77–78.
7. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник. Москва : Машиностроение, 1987. 327 с.
8. Киричок П. О., Олійник В. Г., Киричок Т. Ю. Зміцнення поверхонь металевих деталей. Київ : Преса України, 2004. 240 с.
9. Лотоцька О. І. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей поліграфічних машин. *Технологія і техніка друкарства*. 2008. №3–4. С. 16–20.
10. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. Москва : Машиностроение, 1978. 184 с.

11. Горохов В. А. Обработка деталей пластическим деформированием. Киев : Техника, 1978. 192 с.
12. Одинцов Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. Москва : Машиностроение, 1981. 160 с.
13. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 1978. 152 с.
14. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. Москва : Машиностроение, 1968. 132 с.
15. Зигуля С. Підвищення надійності деталей поліграфічного обладнання вібраційним накатуванням. *11-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей, м. Львів, 15–17 травня 2013 р.* Львів : КІНПАТРИ ЛТД. 2013. С. 164–165.
16. Пшибыльский М. Технология поверхностной пластической обработки. Москва : Металлургия, 1991. 479 с.
17. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Ленинград : Машиностроение, 1982. 248 с.
18. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным рельефом поверхности, полученным виброобкатыванием. *Вестник машиностроения*. 1971. № 2. С. 59–61.
19. Шнейдер Ю. Г., Кузьмин Ю. П., Сорокин В. М. и др. Новый государственный стандарт на поверхности с регулярным микрорельефом. *Вестник машиностроения*. 1982. № 4. С.73–74.
20. Шульман П. А., Сузин Ю. И., Колесниченко Н. Ф., Вишневский А. С. Качество поверхности, обработанной алмазами. Киев : Техніка, 1972. 148 с.
21. Коваленко В. С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров. Киев : Вища школа, 1977. 144 с.
22. Дубнюк В. Л., Худякова О. П., Котляров В. П. Результаты застосування чисельних методів вирішення рівняння

теплопроводности при проектировании операций лазерной поверхностной обработки деталей друкерских верстатив. *Технологія і техніка друкарства*. 2014. № 4(46). С. 52–70.

23. Соснин Н. А., Тополянский П. А., Вичик Б. Плазменные покрытия (технология и оборудование). СПб : Знание, 1992. 28 с.
24. Соснин Н. А., Тополянский П. А., Ермаков С. А. Повышение стойкости деталей машин и инструмента методом плазменно-дугового упрочнения. *Станки и инструмент*. 1990. №11. С. 38–39.
25. Гордеев А. С., Басова А. Г. Восстановление деталей полиграфического оборудования методом газоплазменного нанесения порошковых материалов. *Вісник НТУ «ХПІ»* . 2010. № 46. С. 36–40.
26. Лещинский Л. К., Самотугин С. С., Пирч И. И., Комар В. И. Плазменное поверхностное упрочнение. Київ : Техника, 1990. 109 с.
27. Бурумкулов Ф. Х., Лезин П. П., Сенин П. В., Иванов В. И., Величко С. А., Ионов П. А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). Саранск : Красный Октябрь. 2003. 504 с.
28. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. Москва : Машиностроение, 1980. 783 с.
29. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Караулов А. К., Бершадский Л. И. Поверхностная прочность материалов при трении. Киев : Техника, 1978. 296 с.
30. Эпик А. П., Шавловский Е. Н., Миронов Е. А. и др. Исследование свойств диффузионных карбидных и боридных покрытий на конструкционных сталях. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 1979. Т. 14. № 5. С. 67–70.
31. Мишин В. Н., Шадричев Е. В. Исследование износостойкости борированной стали. *Докл. 25 юбил. науч.-технич. конф. Сев.-зап. заочн. политех. ин-та*. Ленинград, 1981. С. 40–44.

32. Назаренко П. В., Ненастьяна А. Е. Исследование износостойкости керамических покрытий, работающих в гидроабразивной бреде. *Новое в технологии ремонта воздушных судов на заводах гражданской авиации*. Киев : КИИГА, 1992. С. 39–43.
33. Киричок П., Тріщук Р. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном. *Технологія і техніка друкарства*. 2017. № 3 (57). С. 4–19.
34. Киричок П. О., Лотоцька О. І. Експериментальні дослідження геометричних параметрів циліндричних деталей поліграфічних машин при комплексній обробці. *Технологія і техніка друкарства*. 2011. № 3. С. 4–12.
35. Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу : пат. № 55748 Україна : МПК В24В 39/00 / Киричок П. О., Лотоцька О. І. ; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» № u201006779; заявл. 01.06.2010 ; опублік. 27.12.2010, Бюл. № 24. С. 4.
36. Киричок П. О., Хмілярчук О. І. Комплексна оздоблювально-зміцнююча обробка. *Технологія і техніка друкарства*. 2005. №3–4. С. 46–52.
37. Патент України UA 10734 А, МПК В24В39/00. Спосіб утворення мікрорельєфу / Киричок П.О., Хмілярчук О. І. №U200505560. Заявлено 10.06.05. Опубл. 15.11.05. Бюл. № 11.
38. Патент України №18495, МПК В24В39/00. Пристрій для комбінованої обробки плоских поверхонь деталей / Киричок П. О., Хмілярчук О. І., Олійник В. Г. №u200604718; Заявл. 27.04.2006; Опубл. 15.11.2006, Бюл. №11.
39. Спосіб утворення повністю регулярного мікрорельєфу на друкарських циліндрах : пат. № 81651 Україна : МПК В41N 10/00 В41N 7/00 / Киричок П. О., Зигуля С. М. ; заявник і патентовласник Киричок П. О. № 201214875 ; заявл. 25.12.2012 ; опубл. 10.07.2013. Бюл. № 13. 16 с.

40. Патент України на корисну модель Спосіб покращення експлуатаційних властивостей захватів аркушепередавальної системи аркушевих офсетних друкарських машин: пат. No 79894 Україна: МПК (2013.01) B41F 31/00, B41F 21/00, B41N 7/00. Несхозієвський А.В., Несхозієвська Т.М., Киричок П. О.; заявник і патентовласник Несхозієвська Т.М. No u201210682; заявл. 12.09.2012; опублік. 13.05.2013, Бюл. No 9.
41. Киричок П. О. Оздоблювально-зміцнювальна обробка важкодоступних поверхонь. *Технологія і техніка друкарства*. 2005. № 1(7). С. 95–98.
42. Тріщук Р. Підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання шляхом модифікації їх поверхонь методом іонно-плазмового азотування. *Технологія і техніка друкарства*. 2018. № 1 (59). С. 48–59.
43. Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. Ионная химико-термическая обработка сплавов в газовых средах. Москва : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
44. Герасимов С. А., Жихарев А. В., Березина Е. В., Зубарев Г. И., Прянишников В. А. Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 1. С. 13–18.
45. Герасимов С. А., Жихарев А. В., Голиков В. А. и др. Влияние предварительной термической обработки на структуру и свойства азотированных сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 6. С. 24–25.
46. Гаврилова А. В., Герасимов С. А., Косолапов Г. Ф., Тяпкин Ю. Д. Исследование структуры азотированных сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1974. № 3. С. 14–17.
47. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г. И., Бемер З. Теория и технология азотирования. Москва : Металлургия, 1991. 320 с.

48. Фетисов Г. П., Гарифуллин Ф. А. Материаловедение и технология материалов. Москва : Инфра-М. 2014. 397 с.
49. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шапошников В. Н. Оптимизация газодинамических и энергетических параметров ионного азотирования. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1976. № 6. С. 2–6.
50. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. Москва : Машиностроение, 1976. 256 с.
51. Руденко Е. М., Короташ І. В., Семенюк В. Ф., Шамрай К. П. Установка для прецизійного іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок. *Наука та інновації*. 2009. Т. 5. № 5. С. 5–8.
52. Всесвітня організація інтелектуальної власності (WIPO) [Електронний ресурс] : офіц. веб-сайт INT, Inc / засн.: Interactive Network Technologies, Inc. 2011. URL: www.wipo.int.com. Головне меню : 7 найменувань.
53. United States Patent and Trademark Office : offic. web-site / found.: USPTO. 2010. URL: www.uspto.gov. General menu : 8 titles.
54. European Patent Office : offic. web-site / found.: EPO. 2010. URL: www.epo.org. General menu : 6 titles.
55. Український інститут промислової власності [Електронний ресурс] : офіц. веб-сайт / засн.: ДП УІПВ. 2004. URL: www.ukrpatent.org. Головне меню : 4 найменування. Бокове меню : 15 найменувань.
56. Евразийская Патентная Информационная Система [Электронный ресурс] : офиц. веб-сайт / учред.: Евразийское патентное ведомство. 2005. URL: www.eapatis.com. Главное меню : 2 наименования.
57. Deutsches Patent und Markenamt [Elektronen Ressource] : offiz. web-sait / Gründ.: DPMA. 2011. URL: www.dpma.de. Hauptmenü : 11 Titel. Seitenmenü : 3 Titel.
58. Industrial Property Digital Library : offic. web-site / found.: IPDL. 2004. URL: www.ipdl.inpit.go.jp. General menu : 6 titles.

59. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мешерякова. 4-е изд., переработ. и дополн. Москва : Машиностроение, 1985. 2 т. 496 с.
60. Лотоцька О. І. Комплексна технологія формування мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин : дис. канд. техн. наук : 05.05.01. Київ, 2012. 179 с.
61. Шульженко А. А., Ножкина А. В., Богданов Р. К. и др. Износостойкость и термостабильность алмазных поликристаллических композиционных материалов. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Киев, 2008. Вып.11. С. 237–242.
62. Инструменты из сверхтвердых материалов / под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 2014. 608 с.
63. Руденко Е., Панарін В., Киричок П., Свавільний М., Короташ І., Полоцький Д., Тріщук Р. Зміцнення поверхні сталі 45 йонним азотуванням у геліконному розряді. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2018. Т. 40. № 8. С. 993–1004.
64. Олійник В. Г. Підвищення якості й експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання : дис. ...канд. техн. наук : 05.05.01. Київ, 2008. 158 с.
65. Хмілярчук О. І. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання оздоблювально-зміцнюючою обробкою : дис. ...канд. техн. наук: 05.05.01. Київ, 2009. 161 с.
66. Роїк Т. А., Киричок П. О., Гавриш А. П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2007. 404 с.
67. Роїк Т. А., Гавриш А. П., Гавриш О. А. Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні : монографія. Київ : ЕКМО, 2010. 212 с.

68. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. Москва : Машиностроение, 1978. 232 с.
69. Хімичева Г. І., Величко О. М., Іванченко О. В., Долгов М. А., Зенкін А. С. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія і практика : посібник. Київ : Основа, 2006. 443 с.
70. Майданюк С. В., Плівак О. А., Бекмурадов Р.А. Модуль для вимірювання фасонних профілів. *Вісник ЖДТУ*. 2007. №2(41). С 1–4.
71. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
72. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. Москва : Наука, 1976. 230 с.
73. Булычев С. И., Алехин В. П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. Москва : Машиностроение, 1990. 224 с.
74. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Москва : Издательство стандартов, 1993.
75. Коган В. А. Справочник по металлам и сплавам для полиграфистов. Москва : Книга, 1980. 207 с.
76. Трение, изнашивание и смазка : справочник. В 2-х кн.: Кн.2 / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. Москва : Машиностроение, 1979. 358 с.
77. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Д. Г. Красновского. Москва : Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
78. ANSYS Analysis Guide. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear structural analysis. 001087. 4th Edition. SAS IP.
79. Титов А. В., Мозговой С. В., Качан А. Я. Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS. *Вестник двигателестроения*. 2006. № 4. С. 90–96.
80. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики.

81. Тиняев В. Г., Назаренко В. Д., Лахник А. М. Особенности формирования диффузионных слоев на сплавах железа после предварительной пластической деформации. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1996. Т. 18. № 2. С. 45–51.
82. Власов В. М., Жигунов К. В., Иванькин И. С., Васин М. И. Влияние предварительной холодной пластической деформации на кинетику процесса нитрирования теплостойких сталей. *Металловедение и термообработка металлов*. 2002. № 9. С. 39–41.
83. Ковалевская Ж. Г., Клименов В. А., Гончаренко И. М., Коваль Н. Н., Толмачев А. И., Долomanова В. А. Исследование износостойкости стали, упрочненной высокоэнергетическими воздействиями. *Физическая мезомеханика*. 2006. Т. 9. С. 153–156.
84. Белый А. В., Кукареко В. А., Лободаева О. В., Ших С. К. Фазовые и структурные превращения в материалах на основе железа, подвергнутых низкоэнергетической имплантации азотом при высоких плотностях тока. *Физика металлов и металловедение*. 1995. Т. 80. Вып. 6. С. 82–95.
85. Киричок П., Тріщук Р., Рибак О. Розрахунки відносної опорної площі циліндричних поверхонь деталей поліграфічного обладнання при комбінованому зміцненні віброобкатуванням. *Технологія і техніка друкарства*. 2018. № 3 (61). С. 4–13.
86. Ogórek M., Skuza Z., Frączek T. Wpływ wybranych elementów organizacji produkcji na efektywność ekonomiczną procesu azotowania. *Logistyka*. 2015. № 6. С. 351–356.
87. Шнейдер Ю. Г. Новые схемы и методы чистовой обработки металлов давлением. Ленинград, 1967. 32с.
88. Фельдман Я. С. Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин и приборов и их технологическое обеспечение / Под ред. Ю. Г. Шнейдера. Ленинград : ЛИТМО, 1979. 97 с.

89. Рыжов Э. В., Суслов А. Д., Федоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Москва : Машиностроение, 1979. 176 с.
90. Пат. 129043 Україна, МПК (2006) B24B 39/00. Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин / П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, Р. Л. Тріщук; заявник і власник НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». № у 2018 00825; заявл. 30.01.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 6 с.
91. Костик К. О., Костик В. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивостей легованої сталі 30X3BA. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. 2014. № 48. С. 21–41.
92. Каплун В. Г. Особенности формирования диффузионного слоя при ионном азотировании в безводородных средах. *Физическая инженерия поверхности*. 2003. Т. 1. № 2. С. 141–145.
93. Рудик О. Ю. Іонне-азотування: регулювання фізико-механічних властивостей. *Вісник Національного технічного університету*. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. 2017. № 19. С. 22–29.
94. Каплун П. В., Гончар В. А., Тютюнник Б. І., Матвіїшин П. В. Дослідження зносостійкості сталей в корозійно-абразивному середовищі після зміцнення поверхні іонним азотуванням. *Проблеми трибології*. 2017. № 2. С. 16–21.
95. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
96. Радько О. В., Кумуржи О. Ю., Жигінас В. В., Кремешний О. І. Абразивна стійкість сталі 46x13 після зміцнення методом термоциклічного іонно-плазмового азотування. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. 2013. Вип. 1. С. 156–160.

97. Andreev A. A., Volosova M. A., Gorban V. F., Grigoriev S. N., Kidanova N. V., Sobol' O. V., Stolbovoy V. A., Filchikov V. Ye. The use of pulsed ion stimulation to modify the stressed structure state and mechanical properties of vacuum-arc TiN coatings. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2013. Vol. 35, Issue 7. P. 953–963.
98. Wei C. C. Analyses of Material Properties of Nitrided AISI M2 Steel Treated by Plasma Immersion Ion Implantation (PIII) Process. *Advanced Science Letters*. 2012. Vol. 12, Issue 1. P. 148–154.
99. Fernandes B. B., Mändl S., Oliveira S. M., Ueda M. Mechanical properties of nitrogen-rich surface layers on SS 304 treated by plasma immersion ion implantation. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 310. P. 278–283.
100. Gorokhovskiy V., Belluz P. D. B. Ion treatment by low pressure arc plasma immersion surface engineering processes. *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 215. P. 431–439.
101. Köster K., Kaestner P., Bräuer G. K., Hoche H., Troßmann T., Oechsner M. Material condition tailored to plasma nitriding process for ensuring corrosion and wear resistance of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 228. P. 615–618.
102. Campos M., de Souza S. D., de Souza S., Olson-Dionysio M.. Improving the empirical model for plasma nitride AISI 316L corrosion resistance based on Mössbauer spectroscopy. *Hyperfine Interact.* 2011. Vol. 203, Issue 1–3. P. 105–112.
103. Андреев А. А., Шулаев В. М., Саблев Л. П. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления. *Физическая инженерия поверхности*. 2006. Т. 4. № 3–4. С. 191–197.
104. Dhafer, W. A.-R., Kostyk V., Kostyk K., Glotka, A., Chechel M. The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, Issue 5 (81). P. 44–50.

105. Corr C., Plihon, N., Chabert, P., Sutherland, O., Boswell R.W. Spatially limited ion acoustic wave activity in low-pressure helicon discharges. *Phys. Plasmas*. 2004, v. 11. P. 4596–4602.
106. Тріщук Р. Алгоритм керування комплексним технологічним процесом зміцнення циліндричних сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання. *Технологія і техніка друкарства*. 2019. № 2 (64). С. 4–14.
107. Rudenko E. M., Panarin V. Ye., Kyrychok P. O., Svavilnyi M. Ye., Korotash I. V., Palyukh O. O., Polotskyi D. Yu., Trishchuk R. L. Nitriding in a Helicon Discharge as a Promising Technique for Changing the Surface Properties of Steel Parts. *Progress in Physics Metals*. 2019. Vol. 20, No. 3: 485–501.
108. Greene William H. Econometric analysis. Fours Edition – New Jersey : Pearson Education Company, 2016.
109. Радченко С. Г. Методология регрессионного анализа. Київ : «Корнійчук», 2011. 376 с.
110. Draper Norman R., Smith Harry. Applied Regression Analysis Third Edition. New York : John Wiley & Sons, Inc, 1998.
111. Лапач С. Н., Чубенко А. В., Бабич П. Н. Статистика в науке и бизнесе. Киев : Морион, 2002. 640 с.
112. Carlberg C. Regression Analysis Microsoft Excel – Indianapolis : Pearson Education, Inc, 2016.
113. Математическая теория планирования эксперимента / Под. ред. С. М. Ермакова Москва : Наука. ГРФМЛ, 1983. 392 с.
114. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. Киев : ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. 274 с.
115. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1974. 231 с.

116. Солонин И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения. Москва : Машиностроение, 1972. 216 с.
117. Уфимычев Ю. И., Михайлов С. К., Святкин Б. К., Прохоров И. И. Регрессионный анализ качества сталей и сплавов. Москва : Металлургия, 1976. 224 с.
118. Штерензон В. А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций. Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. 66 с. URL: <http://www.rsvpu.ru/filedirectory/3468/shterenзон.pdf>.
119. Барботько А. И., Кудинов В. А., Понкратов П. А., Барботько А. А. Планирование, организация и проведение научных исследований в машиностроении : учебное пособие для вузов. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2013. 499 с.
120. Моргунов А. П., Ревина И. В. Планирование и обработка результатов эксперимента : учеб. пособие для вузов. Омск : Изд. ОмГТУ, 2005. 300 с.
121. Морозов Е. А. Исследование свойств твердосплавного внутреннего покрытия, полученного лазерной наплавкой. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2–2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22828>.
122. Лапач С. Н., Радченко С. Г., Бабич П. Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ). *Программные продукты Украины: каталог*. Киев, 1993. С. 24–27.
123. Лапач С. М. Проблеми побудови регресійних моделей процесів різання металів. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія «Машинобудування». 2014, №3(72). С. 40–47.
124. Лапач С. Н., Радченко С. Г. Основные проблемы построения регрессионных моделей. *Математичні машини і системи*. 2012. № 4. С. 125–133.
125. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

126. Лапач С. Н., Радченко С. Г. Регрессионный анализ в условиях неоднородности факторного пространства. *Математичні машини і системи*. 2016. № 3. С. 55–63.
127. Лапач С. М. Визначення оптимальної кількості кластерів. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014: IX міжнародна науково-практична конференція*. Київ, 23–27 червня 2014 р. С. 272–275.
128. Лапач С. М. Кластерний аналіз при визначенні однорідних областей факторного простору в регресійному аналізі / XV міжнародна конференція ім. акад. Михайла Кравчука, Київ, 15–17 травня 2014 р. Т.3. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. С. 82–84.
129. Титов А. В. Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием для повышения их ресурса : дис. ...канд. техн. наук: 05.03.05. Київ, 2011. – 251 с.
130. Гребеников А. Г., Светличный С. П., Король В. Н., Анпилов В. Н. Анализ напряженно-деформированного состояния авиационных конструкций с помощью системы ANSYS : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. Харьков : НАУ «ХАИ», CADFEM GmbH, АНТО «КНК», 2002. 310 с.
131. Гребенников А. Г. и др. Компьютерные технологии проектирования. В 2 ч. Ч. 2. Харьков : ХАИ, 2001. 499 с.
132. Киричок П. О., Хмілярчук О. І. Програмне забезпечення з розрахунку процесів оздоблювально-зміцнюючої обробки циліндричних поверхонь. *Технологія і техніка друкарства*. 2007. № 3–4. С. 80–85.
133. Киричок П. О. Технологічне забезпечення працездатності та надійності елементів та вузлів поліграфічних машин. *Технологія і техніка друкарства*. 2003. № 1. С. 71–79.

134. Хмілярчук О. І. Комбіновані способи поверхневого пластичного деформування деталей поліграфічного обладнання. *Технологія і техніка друкарства*. 2006. № 3. С. 74–80.
135. Хмілярчук О. І. Підвищення якості та експлуатаційних властивостей деталей технологічного обладнання. *Технологія і техніка друкарства*. 2005. № 1. С. 73–77.
136. Горохов В. А., Спиридонов Н. В. Способы отделочно-упрочняющей обработки материалов : учеб. пособие. Москва : Технопринт, 2003. 96 с.
137. Киричок П. О., Несхозієвський А. В. Дослідження впливу параметрів мікрорельєфу на якість обробки деталі та експлуатаційні характеристики поліграфічного обладнання. *Технологічні комплекси*. 2007. № 3–4. С. 74–80.
138. Олійник В. Г., Киричок П. О. Теоретичні дослідження утворення регулярних мікрорельєфів на металевих поверхнях. *Технологія і техніка друкарства* 2003. № 2. С. 66–72.
139. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT).
140. Shpak A., Rudenko E., Korotash I., Semenyuk V., Odinson V., Pavlov G., Sologub V. Plasma source of low-temperature formation of metal-catalyst nanoclusters. *Nanoindustriya (Nanoindustry)*. 2009. № 4. P. 12–15.
141. Semenuk V.F., Rudenko E.M., Korotash I.V., Osipov L.S., Polotsky D.Yu., Shamrai K.P., Odinson V.V., Pavlov G.Ya., Sologub V.A. Unified technological ion-plasma facility for formation of nanostructures. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2011. Vol. 33. № 2. P. 223–231.
142. Rudenko E. M., Korotash I.V., Semenyuk V. F. , Shamrai K. P. Plant for precision ionic-plasma formation of carbon nanotubes in the united vacuum-technological cycle. *Nauka Innov.* 2009. Vol. 5. № 5. P. 5–9.

143. Korotash I., Odinsonov V., Pavlov G., Rudenko E., Polotsky D., Semenyuk V., Sologub V. A plant for nanostructures formation. *Nanoindustriya (Nanoindustry)*. 2010. № 4. P. 14–19.
144. Osipov L., Rudenko E., Semenyuk V., Korotash I., Odinsonov V., Pavlov G., Sologub V. Highly effective source of low temperature deposition of films and coatings. *Nanoindustriya (Nanoindustry)*. 2010. № 2. P. 4–6.
145. Pat. 87747 UA, IPC C23C 14/34 (2006.01), Plasma device for application of multilayered film coatings, Veremejchenko, G. N., Korotash, I. V., Rudenko, E. M., Semeniuk, V. F., Odinsonov, V. V., Pavlov, H. Y. & Solohub, V. A. Publ. 25.02.2014.
146. Испытания металлов. Сборник статей под редакцией К. Нитцше. Перевод с немецкого Е. В. Лайнер. Москва : Металлургия, 1967. 450 с.
147. Дергачев И. А. Строение, свойства и методы исследования металлов и сплавов. Москва : Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1952. 148 с.
148. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. Москва : Машиностроение, 1984. 264 с.
149. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. Москва : "Высшая школа", 1991. 320 с.
150. Филяев А. Т. Исследование износостойкости сталей, упрочненных наклепом. Минск : Наука и техника, 1974. 168 с.
151. Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. Москва : Машиностроение, 1991. 208 с.
152. Шнейдер Ю. Г. Чистовая обработка металлов давлением. Москва – Ленинград : ГНТИ машиностроительной литературы, 1963. 263 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця 1

Таблиця статистичних характеристик моделі Y

Ім'я / номер коефіцієнта	Коефіцієнт регресії	Стандартні помилки коефіцієнта регресії	Обчислення значущості t	Частка участі
u_1Z_6	-0.0456106	0.00479159	-4.56847	0.127982
x_2Z_4	-0.0458555	0.00405881	-6.59018	0.175558
x_3Z_7	0.0281242	0.00443682	4.72558	0.122908
x_2u_4	0.0616677	0.00460633	6.78102	0.12992
x_3x_4	0.0495209	0.00484587	5.36919	0.0704011
u_4Z_6	0.102316	0.00466625	8.23983	0.0986574
x_3Z_6	0.0472543	0.0043692	5.34931	0.0428891
u_1x_7	0.04391	0.00414459	5.80776	0.0655609
x_4x_5	0.0366041	0.00526547	3.23641	0.0448094
z_5x_6	-0.0277696	0.00381957	-4.44177	0.0344914
u_1Z_4	0.0234183	0.00494039	2.68302	0.00900233
x_5u_7	0.0386339	0.00471838	3.66839	0.0244915
x_5x_6	0.0211883	0.00451923	2.53179	0.0152537

Вільний член: 0,0339303

Таблиця 2

Таблиця мультиколінеарності моделі Y

Ім'я / номер регресора	Максимальний коефіцієнт кореляції	З яким регресором	Коефіцієнт кореляції з відгуком
u_1Z_6	0.251678	x_4x_5	0.358035
* x_2Z_4	0.332294	x_3Z_7	0.325985
* x_3Z_7	0.332294	x_2Z_4	0.232268
* x_2u_4	0.30402	u_1Z_4	0.222364
* x_3x_4	0.391129	u_1Z_4	0.348443
u_4Z_6	0.226485	x_3Z_7	0.357311
x_3Z_6	0.219875	x_3x_4	0.260966
* u_1x_7	0.065908	x_2Z_4	0.0201322
* x_4x_5	0.390667	x_5u_7	0.239929
* z_5x_6	0.252072	x_4x_5	0.145981
* u_1Z_4	0.391129	x_3x_4	0.323807
* x_5u_7	0.390667	x_4x_5	0.0779831
* x_5x_6	0.238734	x_4x_5	0.0223089

* Наявність цих регресорів у рівнянні регресії викликає сумнів.

Таблиця 3

Таблиця залишків (по навчальній матриці) моделі Y

Номер	Відгук по експерименту	Відгук по моделі	Залишок	Відсоток відхилення
1	0.0163	0.0421361	-0.0258361	-158.504
2	0.0076	0.021338	-0.013738	-180.764
3	0.0131	0.0129624	0.000137636	1.05066
4	0.3992	0.384872	0.0143281	3.5892
5	0.0093	0.0348018	-0.0255018	-274.213
6	0.0184	0.0319702	-0.0135702	-73.7511
7	0.0057	0.0238194	-0.0181194	-317.885
8	0.011	0.0126512	-0.00165122	-15.0111
9	0.0063	-0.000306829	0.00660683	104.87
10	0.0129	0.0193401	-0.00644014	-49.9236
11	0.0146	0.014735	-0.000135014	-0.924755
12	0.0109	0.0088709	0.0020291	18.6156
13	0.0092	-0.00852308	0.0177231	192.642
14	0.0168	-0.00493974	0.0217397	129.403
15	0.0094	-0.00384152	0.0132415	140.867
16	0.013	-0.000507766	0.0135078	103.906
17	0.0179	0.0331618	-0.0152618	-85.2612
18	0.0099	0.00415949	0.00574051	57.985
19	0.0103	-0.00114929	0.0114493	111.158
20	0.0194	-0.000150818	0.0195508	100.777
21	0.0868	0.0919546	-0.0051546	-5.93848
22	0.0213	0.0319854	-0.0106854	-50.1661
23	0.0086	0.00407707	0.00452293	52.5923
24	0.0159	0.0377292	-0.0218292	-137.29
25	0.0217	0.0222678	-0.000567833	-2.61674
26	0.0183	-0.00100313	0.0193031	105.482
27	0.0074	0.0181773	-0.0107773	-145.639
28	0.0166	0.0134334	0.00316661	19.076
29	0.0052	-0.00306937	0.00826937	159.026
30	0.0931	0.0851484	0.00795159	8.54091

Вільний член: 0,0339303

Таблиця 4

Належність до кластерів

Назва об'єкту	Номер кластера	
	1	2
Дослід 1	0,025517	0,974483
2	0,45131	0,54869
3	0,667983	0,332017
4	0,07321	0,92679
5	0,538522	0,461478
6	0,792887	0,207113
7	0,656456	0,343544
8	0,894042	0,105958
9	0,226294	0,773706
10	0,855334	0,144666
11	0,569169	0,430831
12	0,192423	0,807577
13	0,697402	0,302598
14	0,187659	0,812341
15	0,128238	0,871762
16	0,796639	0,203361
17	0,433905	0,566095
18	0,111798	0,888202
19	0,060934	0,939066
20	0,911165	0,088835
21	0,484037	0,515963
22	0,373311	0,626689
23	0,744023	0,255977
24	0,911167	0,088833
25	0,11059	0,88941
26	0,428036	0,571964
27	0,856695	0,143305
28	0,191371	0,808629
29	0,809756	0,190244
30	0,039558	0,960442
Wj/n	7707,365	6918,428
S/n	18112,51	18112,51
d2jmax	26320,03	17130,87
Кластер?	Так	Так
Згущення?	Ні	Так

Таблиця 5

Кластер №1

Змінна №1		Змінна №2	
Значення змінної 1	Значення змінної 2	Частота Так	Частота Ні
300	200	0	1
400	300	0	3
150	500	1	0
250	150	0	1
500	300	1	0
250	550	1	0
350	350	2	0
400	400	1	0
150	250	0	2
275	550	1	0
400	150	0	1
150	550	1	0
250	300	0	1
350	150	0	1
450	400	1	0
500	250	0	1
200	150	0	1
250	275	0	1
350	550	2	0
150	350	0	1
500	400	1	0
220	150	0	1
300	400	1	0
500	550	1	0
250	200	0	1

Таблиця 6

Кластер №2

Змінна №1		Змінна №2	
Значення змінної 1	Значення змінної 2	Частота Так	Частота Ні
300	200	1	0
400	300	3	0
150	500	0	1
250	150	1	0
500	300	0	1
250	550	0	1
350	350	0	2
400	400	0	1
150	250	2	0
275	550	0	1
400	150	1	0
150	550	0	1
250	300	1	0
350	150	1	0
450	400	0	1
500	250	1	0
200	150	1	0
250	275	1	0
350	550	0	2
150	350	1	0
500	400	0	1
220	150	1	0
300	400	0	1
500	550	0	1
250	200	1	0

Таблиця 7

Розподіл експериментів за кластерами

Кластер № 1								
P1	R1	S1	P2	R2	S2	а	№ експеримента	Відгук
150	4	0,5	500	2,5	4,9	175	3	0,0131
500	4	0,6	300	2	4,5	175	5	0,0093
250	3,5	0,5	550	2,5	4,9	125	6	0,0184
350	3	0,6	350	2	4,5	275	7	0,0057
400	3,5	0,6	400	2	4,5	200	8	0,011
275	3,5	0,5	550	2	4,5	175	10	0,0129
350	4	0,4	350	2,5	4,9	125	11	0,0146
150	3,5	0,5	550	2	4,5	275	13	0,0092
450	3	0,5	400	2	4,5	275	16	0,013
350	3	0,4	550	2	4,5	200	20	0,0194
500	4	0,5	400	2,5	4,5	275	23	0,0086
350	3,5	0,4	550	2	4,9	200	24	0,0159
300	3,5	0,6	400	2	4,9	220	27	0,0074
500	4	0,4	550	1,5	4,7	275	29	0,0052
Кластер № 2								
P1	R1	S1	P2	R2	S2	а	№ експеримента	Відгук
300	3	0,4	200	1,5	4,7	175	1	0,0163
400	3,5	0,6	300	2	4,5	220	2	0,0076
250	3	0,4	150	1,5	4,7	200	4	0,3992
150	4	0,4	250	1,5	4,7	275	9	0,0063
400	3	0,6	150	1,5	4,7	200	12	0,0109
250	3	0,6	300	1,5	4,5	125	14	0,0168
350	4	0,4	150	1,5	4,9	220	15	0,0094
500	3,5	0,6	250	1,5	4,9	125	17	0,0179
200	4	0,5	150	2,5	4,7	220	18	0,0099
250	3,5	0,6	275	1,5	4,5	175	19	0,0103
400	4	0,4	300	2	4,9	275	21	0,0868
150	3	0,6	350	2,5	4,7	125	22	0,0213
220	3	0,4	150	2,5	4,5	125	25	0,0217
400	4	0,5	300	1,5	4,7	175	26	0,0183
150	3	0,5	250	2,5	4,5	125	28	0,0166
250	3,5	0,5	200	2	4,9	220	30	0,0931

Таблиця 8

Таблиця статистичних характеристик моделі Y за кластером №1

Ім'я / номер коефіцієнта	Коефіцієнт регресії	Стандартні помилки коефіцієнта регресії	Обчислення значущості t	Частка участі
x_3z_5	0.00850781	0.000494713	4.52267	0.375317
x_6z_7	0.00525998	0.000321547	7.39357	0.291456
x_3	-0.00214156	0.000328106	-4.93397	0.135187
x_1x_5	-0.00237198	0.000433523	-1.43029	0.0968256
z_7	-0.00166112	0.000366697	-2.64627	0.0183585
z_2x_6	-0.00158212	0.000324377	-3.31444	0.0377232
x_1x_2	-0.00245421	0.000485188	-1.8694	0.0166119

Вільний член: 0.0120508

Таблиця 9

Таблиця мультиколінеарності моделі Y за кластером №1

Ім'я / номер регресора	Максимальний коефіцієнт кореляції	З яким регресором	Коефіцієнт кореляції з відгуком
x_3z_5	0.525454	x_1x_5	0.664855
* x_6z_7	0.464333	z_7	0.449542
x_3	0.192347	x_1x_5	0.481231
* x_1x_5	0.525454	x_3z_5	0.0042424
* z_7	0.464333	x_6z_7	0.0277621
* z_2x_6	0.234875	x_6z_7	0.14785
x_1x_2	0.237939	x_1x_5	0.399225

* Наявність цих регресорів у рівнянні регресії викликає сумнів.

Таблиця 10

Таблиця залишків (по навчальній матриці) моделі Y за кластером №1

Номер	Відгук по експерименту	Відгук по моделі	Залишок	Відсоток відхилення
1	0.0131	0.0130556	4.43762e-005	0.33875
2	0.0093	0.00954419	-0.000244189	-2.62569
3	0.0184	0.0178403	0.000559723	3.04197
4	0.0057	0.00726916	-0.00156916	-27.5292
5	0.011	0.010476	0.000523972	4.76338
6	0.0129	0.0127595	0.000140535	1.08942
7	0.0146	0.0146846	-8.46036e-005	-0.579477
8	0.0092	0.00850266	0.000697336	7.57974
9	0.013	0.0127507	0.000249317	1.91782
10	0.0194	0.0204242	-0.00102421	-5.27944
11	0.0086	0.00828116	0.000318836	3.70739
12	0.0159	0.0153327	0.000567325	3.56808
13	0.0074	0.00711568	0.00028432	3.84216
14	0.0052	0.00566357	-0.000463572	-8.91485

Таблиця 11

Таблиця статистичних характеристик Y за кластером №2

Ім'я / номер коефіцієнта	Коефіцієнт регресії	Стандартні помилки коефіцієнта регресії	Обчислення значущості t	Частка участі
x ₃	-0.208765	0.00692608	-26.1036	0.121315
x ₄ z ₆	0.226295	0.00478774	23.7428	0.113348
x ₂ z ₄	-0.344006	0.00540951	-18.2746	0.127306
z ₄ u ₇	0.425528	0.00552905	17.3963	0.125888
z ₇	-0.214162	0.00615997	-19.0306	0.161197
x ₇	-0.087962	0.00362548	-13.6389	0.0590428
x ₄	0.146012	0.00515471	16.0902	0.0631496
x ₂ x ₄	-0.102329	0.00357491	-12.3856	0.0966666
x ₃ u ₇	0.0669819	0.00399158	8.70739	0.0669446
z ₁	0.0881452	0.0045177	7.61775	0.0271537
z ₃	0.0268297	0.00409427	3.78338	0.0280057
z ₆	0.0159747	0.00482131	2.93007	0.00739805

Вільний член: 0.0496482

Таблиця 12

Таблиця мультиколінеарності Y за кластером №2

Ім'я / номер регресора	Максимальний коефіцієнт кореляції	З яким регресором	Коефіцієнт кореляції з відгуком
* x_3	0.460766	x_4	0.348303
* x_4z_6	0.370284	x_2z_4	0.305865
* x_2z_4	0.370284	x_4z_6	0.139153
* z_4u_7	0.391772	z_6	0.263971
* z_7	0.568471	z_1	0.191402
* x_7	0.274986	x_4z_6	0.155111
* x_4	0.460766	x_3	0.285029
x_2x_4	0.273277	x_4z_6	0.339004
* x_3u_7	0.287594	z_6	0.0144846
* z_1	0.568471	z_7	0.241613
* z_3	0.220312	z_7	0.0807017
* z_6	0.391772	z_4u_7	0.187307

* Наявність цих регресорів у рівнянні регресії викликає сумнів.

Таблиця 13

Таблиця залишків (по навчальній матриці) Y за кластером №2

Номер	Відгук по експерименту	Відгук по моделі	Залишок	Відсоток відхилення
1	0.0163	0.0160988	0.00020123	1.23454
2	0.0076	0.0159338	-0.0083338	-109.655
3	0.3992	0.399844	-0.000644476	-0.161442
4	0.0063	0.0117408	-0.00544077	-86.3614
5	0.0109	0.00782293	0.00307707	28.23
6	0.0168	0.0139609	0.00283914	16.8997
7	0.0094	0.00453709	0.00486291	51.7331
8	0.0179	0.0119723	0.00592765	33.1154
9	0.0099	0.0106194	-0.000719356	-7.26622
10	0.0103	0.0146198	-0.00431977	-41.9395
11	0.0868	0.0807956	0.00600439	6.9175
12	0.0213	0.0204903	0.000809703	3.80142
13	0.0217	0.0266833	-0.00498329	-22.9645
14	0.0183	0.0137366	0.00456341	24.9367
15	0.0166	0.0215898	-0.00498976	-30.0588
16	0.0931	0.0919543	0.00114571	1.23062

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Видавництва «Політехніка»

КПІ ім. Ігоря Сікорського

С. М. Зигуля

2020 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт констатує, що Видавництвом «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського були використані наукові розробки дисертаційної роботи Тріщука Руслана Любомировича, які спрямовані на розробку нового технологічного процесу обробки сталевих циліндричних деталей поліграфічного обладнання, який досягається комбінацією методів обробки поверхнево-пластичним деформуванням та модифікації поверхневих шарів іонно-плазмовим азотуванням для підвищення експлуатаційних властивостей поліграфічного обладнання та параметрів якості вихідної продукції.

В умовах виробництва прийнятий до впровадження комплексний технологічний процес формування експлуатаційних властивостей циліндричних деталей поліграфічного обладнання.

Можливий річний економічний ефект від впровадження комплексного технологічного процесу становить 48000 грн (сорок вісім тисяч грн).

ВИКОНАВЕЦЬ:

Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

д.т.н., професор

П. О. Киричок

асистент

Р. Л. Тріщук

ПОГОДЖЕНО:

Заст. Директора з виробництва
видавництва «Політехніка»

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Л. О. Сігорська

Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер ДП «Київська
офсетна фабрика»

П. Д. Кошай

2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

основних положень дисертаційної роботи

Тріщука Руслана Любомировича

Цей акт констатує, що державним підприємством «Київська офсетна фабрика» були використані наукові розробки дисертаційної роботи, направлені на створення та ефективне використання сучасних технологій для підвищення експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання.

В умовах виробництва за участю Р. Л. Тріщука відпрацьований і прийнятий до впровадження технологічний процес формування експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного обладнання.

Можливий річний економічний ефект від впровадження технологічного процесу 98000 грн (дев'яносто вісім тисяч грн).

ВИКОНАВЕЦЬ:

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

д-р. техн. наук, професор

П. О. Киричок

асистент

Р. Л. Тріщук

Додаток Г



Акт впровадження результатів дисертаційної роботи Тріщука Руслана Любомировича

Розроблена за результатами наукових досліджень дисертантом Тріщуком Р. Л. технологія пластичного деформування при поверхневих шарів круглих деталей поліграфічних машин, яка полягає у створенні на поверхні деталей регулярного мікрорельєфу, використовується на поліграфічному підприємстві «Державне видавництво «Преса України» з метою підвищення міцності та експлуатаційної зносостійкості круглих деталей виконавчих механізмів.

Технологічний процес зміцнювального пластичного деформування передбачає створення спочатку постійного регулярного мікрорельєфу з наступним утворенням частково регулярного мікрорельєфу у вигляді плоско-паралельних заглибин, нанесених під кутом до осі круглих деталей, які використовуються у ролико-валкових механізмах обертового пресування і координатного транспортування у фальцювальних лініях.

Використання розробленого в дисертаційній роботі параметричного комплексу налаштування технологічних параметрів зміцнювального технологічного процесу сприятиме його стабілізації, за рахунок визначених показників металообробних процесів, що залежать від діаметру круглих деталей і матеріалів виготовлення.

Позиціонування розгортки напівфабрикатів у фальцювальній лінії в процесі обертового пресування і координатного транспортування позитивно впливатиме на якість і тиражну стабільність виготовленої продукції, а також на тривалість експлуатаційного ресурсу лінії.

Можливий річний економічний ефект від впровадження запропонованого технологічного процесу пластичного деформування при поверхневих шарів круглих деталей поліграфічних машин 47 000 (сорок сім тис.) грн.

Видавничо-поліграфічний інститут
Національного технічного
Університету України «Київський
Політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського»

Науковий керівник:
д.т.н., професор



Виконавець:
асистент

П. О. Киричок

Р. Л. Тріщук

Державне видавництво
«Преса України»

Головний інженер

А. О. Костінський



Додаток Д

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Видавничо-поліграфічний інститут
Державне видавництво «Преса України»

ПОГОДЖЕНО:

Перший заступник директора
Видавничо-поліграфічного
Інституту



Н.Л.Талімонова

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер
Державного видавництва
«Преса України»



А.О.Костінський

15 травня 2019 року

ІНСТРУКЦІЯ

по технологічному процесу утворення мікрорельєфу на поверхні
транспортувально-координуючого валу

м. Київ-2019

1. ТЕХНОЛОГІЯ ДВОХЕТАПНОГО ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ПОВЕРХНІ ТРАНСПОРТУВАЛЬНО-КООРДИНУЮЧОГО ВАЛУ.

Дана технологія утворення мікрорельєфу на циліндричній поверхні деталі (валу) полягає в тому, що за допомогою оздоблювально-зміцнювальної установки ОЗУ 17.00.03 здійснюється обробка пластичним деформуванням поверхні в два етапи: на першому етапі на поверхні формують повністю регулярний мікрорельєф, а на другому – на поверхні з постійним регулярним мікрорельєфом утворюють частково регулярний мікрорельєф у вигляді прямих поздовжніх ліній.

1.1. На першому етапі утворення повністю регулярного мікрорельєфу гексагонального типу ввігнутої форми забезпечується складним рухом деформуючого елемента відносно оброблюваної поверхні та контактуванням з кожним виступом мікронерівностей вихідної поверхні з різних сторін, розгортаючи метал у різних напрямках. В результаті такого підходу опір деформуванню зменшується, а інтенсивність деформації збільшується, що дозволяє при обробці деталей утворювати оптимальний рельєф і одержувати значне зміцнення поверхні без значної загальної деформації заготовки.

1.2. На другому етапі на поверхні утворюють частково-регулярний мікрорельєф у вигляді прямих заглибин, розташованих паралельно осі циліндра на відстані одна від одної не менше $2b$ і площею не менше 30% від площі поверхні вала.

В результаті обробки на другому етапі відбувається повне вигладжування й утворення нового мікрорельєфу, висота, форма й розташування мікронерівностей якого визначаються не тільки величиною зусилля, але й діаметром кулі, швидкістю, подачею, числом осциляцій й амплітудою коливання кулі. При подальшому збільшенні зусилля відбувається зростання шорсткості.

2. ПРИЗНАЧЕННЯ. ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ ОЗУ 17.00.03.

2.1. Оздоблювально-зміцнювальна установка призначена для створення на зовнішніх циліндричних поверхнях повністю, або частково-регулярного мікрорельєфу у вигляді однорідних канавок ввігнутого типу або вигладжування поверхонь на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16K20.

2.2. Оздоблювально-зміцнювальна установка ОЗУ 17.00.03 дозволяє обробляти методом поверхнево-пластичного деформування зовнішні циліндричні поверхні на незагартованих і загартованих цементованих сталях, кольорових металів та сплавів.

Технічні характеристики токарно-гвинторізного верстата 16K20:

межі частот обертання шпинделя, об/хв – 12,5-1600

поздовжня подача, мм/об – 0,05..2,8

габарити установки, мм – 2795 × 1190 × 1500

вага верстата, кг – 3010

розміри деталі, що обробляється, мм

довжина – 710

діаметр – 220

максимально вага деталі, що обробляється, кг – 200

Технічні характеристики установки для утворення мікрорельєфу:

частота обертання двигуна (n_4), об/хв – 1600

зусилля стискання пружини (P), Н – до 400

радіус сфери алмазного вигладжувала (R), мм – 1..4

ексцентриситет (e), мм – 0,5..3

3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ

3.1. До роботи на установці допускаються робітники, які пройшли інструктаж з техніки безпеки і мають право працювати на токарних верстатах. Особи віком до 18 років до роботи не допускаються.

3.2. Електрообладнання і пускові пристрої верстата повинні бути в справному стані і заземлені згідно правил безпеки.

3.3. Перед початком роботи:

а) привести в порядок робоче місце - прибрати непотрібні роботі предмети, витерти місце на підлозі

б) перевірити закріплення кожухів над шестернями

в) переконатися в справності токарно-гвинторізного верстата 16К20

г) перевірити наявність індустріального масла "И-20" в редукторі установки.

3.4. Під час роботи:

а) ввімкнути токарний верстат при частоті обертання шпинделя 10 об/хв, переконавшись у справності роботи установки. Ввімкнути прискорену поздовжню подачу, переконавшись у справності. Вмикати установку має право тільки робітник, котрий її обслуговує.

б) забороняється здійснювати будь-які роботи з налагодження установки при обертанні шпинделя верстата.

3.5. Після закінчення роботи:

привести робоче місце в порядок відповідно до типової інструкції для токарів.

4. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ

Установка для утворення мікрорельєфу складається з наступних основних елементів, від яких залежить налагодження:

- токарно-гвинторізний верстат 16K20
- пристрій для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь (рис.1)

На рис. 1 наведено пристрій для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь, в якому деформуючий елемент отримує осциляції інструмента від автономного електродвигуна. Установка кріпиться в різцетримачі токарного верстата за допомогою планки 7.

Принцип роботи пристрою:

Обертальний рух електродвигуна 19 через ротор електродвигуна 18 за допомогою змінного ексцентрика 17 перетворюється на зворотньо-поступальний рух тяги 15. На змінному ексцентрику 17 встановлюють підшипник 16, який забезпечує рух тяги 15. Тяга рухається у збірному корпусі 12, 13, 14. У збірному корпусі розміщено державку 6, тягу 4, зворотньо-поступальний рух до яких передається через осі 9, 10, які розміщені у вкладишах 8, 11. Величина зусилля вдавлювання передається через тягу 4 і забезпечується стисканням тарованої пружини 2 гвинтом 1. На тязі 4 закріплено алмазний вигладжувач 3, робоча частина якого – штучний алмаз карбонадо – АСПК.

5. ПОРЯДОК РОБОТИ НА УСТАНОВЦІ

- 5.1. Встановити циліндричну деталь (вал) у центрах токарного верстата для утворення мікрорельєфу відповідно до технології (див. п.п. 1, 7).
- 5.2. Встановити необхідні режими обробки (частоту обертання шпинделя і подачу на оберт) згідно з рекомендаціями (див. п.6, табл.1) в залежності від етапу обробки.
- 5.3. Підвести алмазний накінецьник 3 до деталі до дотику з нею та піджати із заданим зусиллям. Встановити ліміт поперечної подачі верстата на поділку "0".

- 5.4. Ввімкнути задану кількість обертів шпинделя.
- 5.5. Ввімкнути задану поздовжню подачу різцетримача з вібраційною установкою.
- 5.6. На першому етапі обробки утворити повністю регулярний мікрорельєф відповідно до порядку роботи установки на першому етапі.
- 5.7. На другому етапі обробки утворити частково регулярний мікрорельєф відповідно до порядку роботи установки на другому етапі.
- 5.8. Вимкнути поздовжню подачу установки.
- 5.9. Відвести алмазний накінецьник від деталі.
- 5.10. Вимкнути обертання шпинделя з деталлю.
- 5.11. Відвести поперечний супорт з різцетримачем і вібраційною установкою в початкове положення.
- 5.12. Зняти деталь з верстата.

6. ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ УСТАНОВКИ

- 6.1. Ремонт і експлуатацію верстата проводити відповідно до вимог технічного обслуговування токарно-гвинторізного верстата 16K20 (див. паспорт).
- 6.2. Виконувати поточне змащування вала 1, шестерень та підшипників установки в разі потреби, забезпечивши плавну (без шуму) роботу її вузлів.

7. РЕЖИМИ ВІБРООБРОБКИ ТА ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

- 7.1. Для отримання регулярного мікрорельєфу з необхідними параметрами на поверхні деталей типу валів на установці ОЗУ 17.00.03 потрібно на першому етапі на поверхні валу утворити повністю регулярний мікрорельєф гексагонального типу радіусом сфери деформуючого інструменту $R = 3...4$ мм; зусиллям вдавлювання $P = 150 - 500$ Н; ексцентриситет інструмента $e = 0,2 - 1,0$ мм; частотою обертання шпинделя

Виконати обробку валу механізму транспортування діаметром $d_3=65$ мм, виготовленого зі сталі 45 з вихідною твердістю HRC 44...46 в два етапи:

- **Етап 1:** згідно порядку роботи (див. п.5) на установці ОЗУ 17.00.03 утворити на поверхні повністю регулярний мікрорельєф деформуючим елементом радіусом $R=3$ мм з наступними режимами обробки – подача $S_1=0,08$ мм/об., сила вдавлювання індентора $P_1=150$ Н, частота обертання заготовки $n_{31}=125$ об/хв., частота осциляції інструмента $n_{\text{подв.х}}=1300$ подв./хв., амплітуда осциляції $e=1$ мм.
- **Етап 2:** згідно порядку роботи (див. п.5) на установці ОЗУ 17.00.03 утворити частково-регулярний мікрорельєфу у вигляді прямих поздовжніх ліній інструментом з радіусом деформуючого елемента $R=1,5$ мм з наступними режимами обробки – подача $S_2=0,08$ мм/об., сила вдавлювання індентора $P_2=75$ Н, частота обертання заготовки $n_{32}=0$ об./хв.

РЕЖИМ ОБРОБКИ

[illegible]

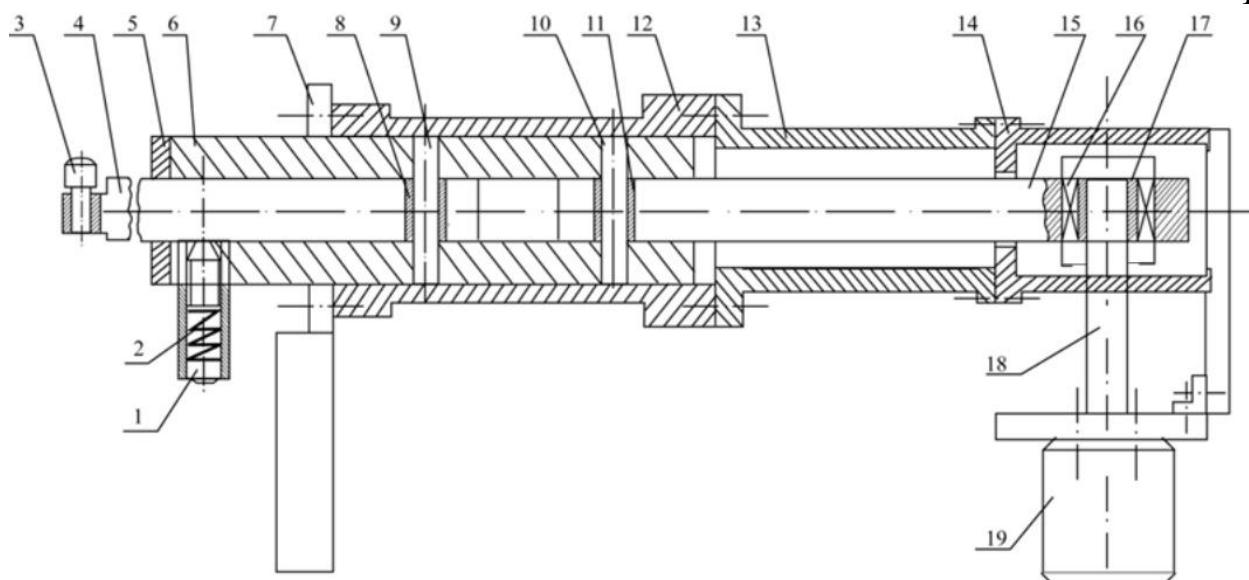


Рис. 1 Схема установки ОЗУ 17.00.03 для вібраційного обкатування зовнішніх циліндричних поверхонь, яка кріпиться в різцетримачі: 1 – гвинт, 2 – тарована пружина, 3 – алмазний вигладжувач, 4 – тяга, 5 – кришка, 6 – державка, 7 – планка, 8 – вкладиш, 9 – ось, 10 – ось, 11 – вкладиш, 12, 13, 14 – корпус, 15 – тяга, 16 – підшипник, 17 – змінний ексцентрик, 18 – ротор електродвигуна, 19 – електродвигун